ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ КРИПТОНА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Ni-Co-Fe-Cr-Mn

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

Исследована стойкость структурно-фазового состояния высокоэнтропийных сплавов NiCoFeCr и NiCoFeCrMn к облучению ионами Kr. В работе применялись методы рентгеноструктурного анализа для определения макронапряжений, а также плотности дислокаций. Установлено влияние напряжений и плотностей дислокаций на стойкость структурно-фазового состояния высокоэнтропийных сплавов NiCoFeCr и NiCoFeCrMn после облучения ионами криптона. Системы NiCoFeCr и NiCoFeCrMn представляют собой однофазную ГЦК структуру на основе твердого раствора (Ni, Co, Fe, Cr) и (Ni, Co, Fe, Cr, Mn), 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 сплавов NiCoFeCr и NiCoFeCrMn к облучению ионами криптона.

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

EFFECT OF KRYPTON ION IRRADIATION ON THE STRUCTURAL-PHASE STATE OF HIGH-ENTROPY ALLOYS BASED ON Ni-Co-Fe-Cr-Mn

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

The resistance of the structural-phase state of high-entropy NiCoFeCr and NiCoFeCrMn alloys to Kr ion irradiation has been investigated. The methods of X-ray diffraction analysis were used to determine macro stresses, as well as the density of dislocations. The influence of stresses and dislocation densities on the stability of the structural-phase state of high-entropy NiCoFeCr and NiCoFeCrMn alloys after irradiation with krypton ions has been established. NiCoFeCr and NiCoFeCrMn systems are a single-phase HCC structure based on a solid solution (Ni, Co, Fe, Cr) and (Ni, Co, Fe, Cr, Mn), both in the initial state and after irradiation with Kr ions at fluences of 5×10^{15} and 1×10^{16} cm^{-2}. It is shown that in the initial state, the macro stresses are tensile, after irradiation, the stresses turn into compressive, and with an increase in the radiation dose, the compressive stresses increase.

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

Введение

Основное предъявляемое требование к конструкционным материалам ядерных реакторов – это сохранение их механических свойств (прочность, пластичность) и структурной целостности (устойчивость к радиационному набуханию и ползучести) в условиях облучения частицами с различными энергиями.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), состоящие из четырех или более элементов в равномолярных или почти равномолярных составных частях, были предложены в качестве одного из кандидатов для конструкционных материалов перспективных ядерных систем. ВЭС имеют ряд перспективных свойств, таких как высокая прочность, пластичность, износостойкость и коррозионная стойкость. Именно поэтому они вызвали интерес к изучению их радиационной стойкости структурно-фазового состояния [1].

Поскольку растворимость инертных газов в металлической системе ограничена [2], имплантированные атомы будут диффундировать и связываться с вакансиями с образованием пузырьков, а поведение точечных дефектов, включая их подвижность и концентрацию, будет оказывать значительное влияние на поведение имплантированные атомы, а также на образование пузырьков. В работе [3] 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.

В работе [4] показано, что с увеличением дозы при облучении чистого никеля низкоэнергетическими ионами криптона (300 кэВ), концентрация дефектов линейно возрастает и при определенном значении повреждающей дозы выходит на насыщение, при этом на поверхности образуются дефекты типа блистеров. Аналогичный результат был получен в исследовании влияния облучения низкоэнергетическими ионами гелия [5]. Тяжелые частицы криптона с энергией 300 кэВ создают каскады с большим выделением энергии, приводящим к повреждению структуры кристалла на глубину, превышающую пробег ионов гелия.

Материалы и методы исследования

В работе исследованы образцы высокоэнтропийных сплавов NiCoFeCr, NiCoFeCrMn и чистый Ni, 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 $\sin^2\psi$, широко используемый для рентгенографического определения макронапряжений, предполагает проведение съемок при различных углах наклона или поворота [6].

Для определения значений плотности дислокаций применялся метод Вильямсона-Холла: графический метод определения размера ОКР и величины микродеформаций, используя график зависимости $\beta\cos(\theta)$ от $\sin(\theta)$ в приближении, что функции вклады размера ОКР и микродеформаций описываются функциями Лоренца (β - интегральная ширина линии) [6].

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным результатам РСА, рентгенограммы всех образцов демонстрируют формирование однофазной системы на основе твердого раствора (Ni,Co,Fe,Cr) и (Ni,Co,Fe,Cr,Mn) для четырех- и пятикомпонентного ВЭС с ГЦК структурой. Облучение ионами криптона не вызвало изменение фазового состава высокоэнтропийных сплавов, но при этом наблюдалось уширение и сдвиг в сторону меньших углов дифракционных пиков твердых растворов (Ni,Co,Fe,Cr) и (Ni,Co,Fe,Cr,Mn), что объясняется увеличением макронапряжений и плотностей дислокаций.

Применение вышеописанных методов РСА позволило нам оценить значения макронапряжений и плотностей дислокаций в исследуемых образцах. В исходном состоянии макронапряжения из-за холодной прокатки образцов являются растягивающими, после облучения напряжения переходят в сжимающие и при увеличении дозы облучения по модулю сжимающие напряжения возрастают, плотности дислокаций аналогично с увеличением дозы воз-

растают, как видно из рис. 1.

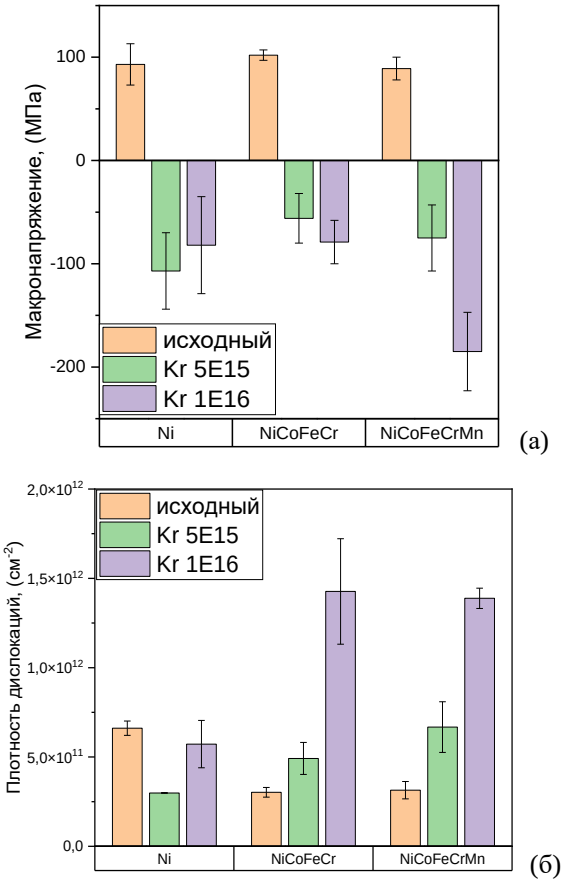

Рис. 1. Полученные значения в образцах Ni, NiCoFeCr и NiCoFeCrMn, исходных и облученных ионами криптона с энергией 280 кэВ при дозах 5×10^{15} и 1×10^{16} см$^{-2}$: а – макронапряжения; б – плотности дислокаций

Заключение

Таким образом, системы NiCoFeCr и NiCoFeCrMn представляют собой однофазную ГЦК структуру на основе твердого раствора (Ni,Co,Fe,Cr) и (Ni,Co,Fe,Cr,Mn), как в исходном состоянии, так и после облучения ионами Kr при флюенсах 5×10^{15} и 1×10^{16} см$^{-2}$. Значения макронапряжений и плотности дислокаций для высокоэнтропийных сплавов выше, чем для чистого никеля, при этом с увеличением сложности химического состава напряжения также увеличиваются, что можно объяснить тем, что с атомистической точки зрения предполагается более высокий энергетический барьер для миграции имплантированных атомов в ВЭС путем замещения, т.е. предпологается подавленная подвижность криптона с увеличением сложности состава ВЭС.

Библиографические ссылки

1. Kumar N. A. P. K., Li C., Leonard K.J., Bei H., Zinkle S.J. Microstructural stability and mechanical behavior of FeNiMnCr high entropy alloy under ion irradiation. *Acta Materialia* 2016; 113(1): 230-244.
2. Trinkaus H., Singh B. Helium accumulation in metals during irradiation – where do we stand? *Journal of Nuclear Materials* 2003; 323(2): 229-242.
3. Zhao S., Egami T., Stocks G. M., Zhang Y. Effect of d electrons on defect properties in equiatomic NiCoCr and NiCoFeCr concentrated solid solution alloys. *Physical Review Materials* 2018; 2(1): 1-8.
4. Толстолуцкая Г.Д., Копанец И.Е., Неклюдов И.М., Марченко И.Г. Профили дефектов, распределение и местоположение гелия, аргона, криптона и ксенона, ионно-имплантированных в никель. *Вопросы атомной науки и техники* 2006; 4(1): 52-59.
5. Углов В.В., Кондрусь И.В. Радиационная стойкость высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn к высокотемпературному облучению ионами гелия. В кн.: Дудчик Ю.И., редактор. Материалы 7-й Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». (18 – 19 мая 2023 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2023. С. 316-318.
6. Ягодкин Ю.Д. Применение электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа для определения размеров структурных элементов в нанокристаллических материалах. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов* 2007; 73(1): 38-49.