ИЗУЧЕНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СоCrFeNi И CoCrFeMnNi ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ГЕЛИЕМ

И.А. Иванов¹⁾, В.В. Углов²⁾, А.Е. Рыскулов¹⁾, Б.С. Аманжулов^{1), 3)}, А.Е. Курахмедов¹⁾, Е.О. Унгарбаев^{1), 3)} ¹⁾Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова 1, Алматы 050032, Казахстан, igor.ivanov.inp@gmail.com, ryskulov_nbd@mail.ru, kurahmedov.alisher@gmail.com, amanzhulov_bs_1@enu.kz, ye1.7ung@gmail.com ²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь; uglov@bsu.by ³⁾Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева,

ул. Сатпаева 2, Астана 010008, Казахстан

В данной работе был проведен элементный анализ сплавов CoCrFeNi и CoCrFeMnNi методом Резерфордовского обратного рассеяния (RBS) на пучке ионов ¹⁴N²⁺ с энергией 14 MэB. CoCrFeNi и CoCrFeMnNi являются высокоэтропийными сплавами (BЭC) с околоэквиатомными концентрациями элементов с равномерным распределением элементов по глубине. При облучении ионами гелия He^{2+} с энергией 40 кэB с флюенсами 5×10^{16} см⁻² и 2×10^{17} см⁻² изменения концентраций минимальны, благодаря уменьшению потока дефектов к местам поглощения. CoCrFeNi и CoCrFeMnNi обладают значительной устойчивостью к радиационной сегрегации.

Ключевые слова: Резерфордовское обратное рассеяние; высокоэнтропийные сплавы; радиационная сегрегация; элементный анализ.

STUDY OF SEGREGATION IN CoCrFeNi AND CoCrFeMnNi HIGH-ENTROPY ALLOYS

I.A. Ivanov¹⁾, V.V. Uglov²⁾, A.E. Ryskulov¹⁾, B.S. Amanzhulov^{1), 3)}, A.E. Kurakhmedov¹⁾, Ye.O. Ungarbayev^{1), 3)}

¹⁾Institute of Nuclear Physics, 1 Ibragimov Str., 050032 Almaty, Kazakhstan, igor.ivanov.inp@gmail.com, ryskulov_nbd@mail.ru, kurahmedov.alisher@gmail.com, amanzhulov bs 1@enu.kz, ye1.7ung@gmail.com

²⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave, 220030 Minsk, Belarus, uglov@bsu.by ³⁾L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev Str., 010008 Astana, Kazakhstan

The elemental analysis of CoCrFeNi and CoCrFeMnNi alloys was conducted using Rutherford Backscattering Spectroscopy (RBS) on the beam of 14 MeV ¹⁴N²⁺ ions. CoCrFeNi and CoCrFeMnNi are high-entropy alloys (MEAs) with near-equiatomic composition and uniform distribution of elements by depth. When CoCrFeNi and CoCrFeMnNi were irradiated with He²⁺ with energy 40 keV with fluences 5×10^{16} cm⁻² and 2×10^{17} cm⁻², concentration changes were minimal due to a decrease in the flux of defects to sinks. CoCrFeNi and CoCrFeMnNi have significant resistance to radiation-induced segregation.

Keywords: Rutherford Backscattering Spectroscopy; high-entropy alloys; radiation-induced segregation; elemental analysis.

Введение

Конструкционные материалы для реакторов четвертого поколения должны выдерживать повреждающие дозы радиации около 100 сна (смещений-на-атом) и температуры в 500-800°С при работе до 60 лет [1, 2]. По сравнению с обычными конструкционными материалами реакторов, такими как аустенитные стали, высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) NiCoFeCr, NiCoFeCrMn более стойки к радиационной сегрегации [3], образованию вторичных фаз [4], пустотному распуханию [5] при облучении гелием и тяжелыми ионами, обладают высокой коррозионной стойкостью [4, 6].

15-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus СоСгFеМnNi является ВЭС со структурой ГЦК, так как ВЭС это сплавы из пяти и более металлов, с околоэквиатомными концентрациями главных элементов не менее 5-35 ат. % [7]. Также ВЭС – сплавы с конфигурационной энтропией $\Delta S_{\text{конф}} \ge 1.5 \text{R}$, а для среднеэнтропийных сплавов (СЭС) $1.0 \le \Delta S_{\text{конф}} \le 1.5 \text{R}$ [8], поэтому СоСгFeNi считается ГЦК СЭС. Радиационная устойчивость ВЭС значительно зависит не только от сложности состава, но и от составляющих элементов.

Цель данной работы – анализ состава и распределения элементов в сплавах CoCrFeNi и CoCrFeMnNi с помощью Резерфордовского обратного рассеяния для изучения влияния облучения гелием на сегрегацию элементов в данных ВЭС.

Материалы и методы

Образцы сплавов были изготовлены в Пекинском Технологическом Институте. Порошки чистых металлов Ni, Co, Fe, Cr, Mn (чистота до 99.97%) прошли дуговую плавку в высокочистой атмосфере аргона и отливались в слитки в медных кюветах. Далее был произведен отжиг при температуре 1150°С в течение 24 ч. Полученные образцы подверглись холодной прокатке до уменьшения толщины слитков на 85%, и прошли отжиг при 1150°С в течение 72 ч.

Облучение CoCrFeNi и CoCrFeMnNi производилось на циклотроне ДЦ-60 (Астана, Казахстан) ионами He²⁺ с энергией 40 кэВ с флюенсами 5×10¹⁶ см⁻² и 2×10¹⁷ см⁻². Состав и распределение элементов по глубине сплавов были изучены на циклотроне ДЦ-60 методом RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) на коллимированном пучке ионов ¹⁴N²⁺ с энергией 14 МэВ. Обратно рассеянные ионы регистрировались полупроводниковым поверхностно-барьерным Au-Si детектором с площадью 50 мм², разрешением энергии детектора ≈11 кэВ. Данные RBS были обработаны в программе RUMP [9]. Относительная погрешность элементных концентраций сплавов составляла менее 6% и была рассчитана из экспериментальных данных.

Результаты и их обсуждение

Таблица 1 показывает, что элементные составы сплавов CoCrFeNi и CoCrFeMnNi являются близкими к эквиатомным до и после облучения – около 25 и 20 ат. %, соответственно.

Таблица 1. Элементный состав, полученный мето-										
дом	RBS,	для	исходных	И	облученных	сплавов				
CoCrFeNi и CoCrFeMnNi										

Сплав Концентрация элементов, а						
	Ni	Co	Fe	Cr	Mn	
CoCrFeNi (исходный)	17.9	28.9	26.2	26	—	
СоСгFеNi (He ²⁺ , 5×10 ¹⁶ см ⁻²)	19.8	27.5	27.7	25	—	
СоСгFеNi (He ²⁺ , 2×10 ¹⁷ см ⁻²)	18.5	31	25	25.5	—	
CoCrFeMnNi (исходный)	17.9	22.3	17.9	20	21.9	
СоСгFeMnNi (He ²⁺ , 5×10 ¹⁶ см ⁻²)	19.6	18.8	18.3	21.3	22	
СоСгFeMnNi (He ²⁺ , 2×10 ¹⁷ см ⁻²)	21	19.7	20.6	18.4	20.3	

Небольшие отклонения от эквиатомных концентраций, вероятно, связаны с близкими массами элементов и погрешностями экспериментальных измерений.

Соответствие экспериментальных и теоретических результатов RBS в RUMP, которые показаны на рис. 1-6 черной и красной линией соответственно, указывает на равномерное распределение элементов по глубине до и после облучения, с соответствующими концентрациями данными в табл. 1.

Относительно малый рост Ni/Co/Fe по сравнению с сегрегацией при облучении никелем, вероятно, связан с искажением решеток BЭС CoCrFeNi и CoCrFeMnNi, что приводит к улучшенной рекомбинации вакансий/междоузлий и уменьшению потока дефектов к местам поглощения [3, 4]. Рост концентраций Ni/Fe также, вероятно, связан с ростом количества дислокаций, что увеличивает количество мест поглощения дефектов [10].

CoCrFeNi и CoCrFeMnNi являются

¹⁵⁻я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus

Секция 3. Влияние излучений на структуру и свойства материалов Section 3. Radiation Influence on the Structure and Properties of Materials



Рис. 1. Спектр RBS исходного сплава CoCrFeNi



Рис. 2. Спектр RBS сплава CoCrFeNi облученного флюенсом 5×10^{16} см⁻²



Рис. 3. Спектр RBS сплава CoCrFeNi облученного флюенсом 2×10^{17} см⁻²



Рис. 4. Спектр RBS исходного сплава CoCrFeMnNi



Рис. 5. Спектр RBS сплава CoCrFeMnNi облученного флюенсом $5{\times}10^{16}~{\rm сm}^{-2}$



Рис. 6. Спектр RBS сплава CoCrFeMnNi облученного флюенсом $2{\times}10^{17}~{\rm сm}^{-2}$

15-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus

средне- и высокоэнтропийными сплавами с высокой устойчивостью к радиационной сегрегации.

Заключение

Методом RBS было подтверждено, что в высокоэнтропийных сплавах CoCrFeNi и CoCrFeMnNi околоэквиатомный состав и сохраняется равномерное распределение элементов по глубине при облучении. Таким образом, CoCrFeNi и CoCrFeMnNi являются перспективными кандидатами в качестве конструкционных материалов устойчивых к радиационным повреждениям.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН АР14872199).

Библиографические ссылки

- 1. Воеводин В.Н. Конструкционные материалы ядерной энергетики вызов 21 века. Вопросы атомной науки и техники. 2007; (2):10–22.
- Zinkle S.J., Tanigawa H., Wirth B.D. Radiation and Thermomechanical Degradation Effects in Reactor Structural Alloys. B: Structural Alloys for Nuclear Energy Applications. Elsevier; 2019: 163–210. Доступно на: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123970466000058
- 3. Lu C, Yang T, Jin K, Gao N, Xiu P, Zhang Y, и др. Radiation-induced segregation on defect clusters in

single-phase concentrated solid-solution alloys. *Acta Materialia*. 2017; 127: 98-107.

- 4. Zhang Z, Armstrong DEJ, Grant PS. The effects of irradiation on CrMnFeCoNi high-entropy alloy and its derivatives. *Progress in Materials Science*. 2022; 123: 100807.
- Huang SS, Guan HQ, Zhong ZH, Miyamoto M, Xu Q. Effect of He on the irradiation resistance of equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Journal of Nuclear Materials*. 2022; 561: 153525.
- Kukshal V, Patnaik A, Bhat IK. Effect of Mn on corrosion and thermal behaviour of AlCr 1.5 CuFeNi 2 Mn x high-entropy alloys. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng.* 2018; 377: 012023.
- Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., и др. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Adv Eng Mater*. 2004; 6(5): 299-303.
- Gao M.C., Yeh J.W., Liaw P.K., Zhang Y., редакторы. High-Entropy Alloys [Интернет]. Cham: Springer International Publishing; 2016 [цитируется по 23 май 2023 г.]. Доступно на: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-27013-5
- Doolittle L.R. Algorithms for the rapid simulation of Rutherford backscattering spectra. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1985; 9(3): 344-51.
- 10. Barr CM, Nathaniel JE, Unocic KA, Liu J, Zhang Y, Wang Y, и др. Exploring radiation induced segregation mechanisms at grain boundaries in equiatomic CoCrFeNiMn high entropy alloy under heavy ion irradiation. *Scripta Materialia*. 2018; 156: 80-4.

¹⁵⁻я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus