

ИЗУЧЕНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ CoCrFeNi 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 Резерфордского обратного рассеяния (RBS) на пучке ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ с энергией 14 МэВ. CoCrFeNi и CoCrFeMnNi являются высокоэнтропийными сплавами (ВЭС) с околоэквиатомными концентрациями элементов с равномерным распределением элементов по глубине. При облучении ионами гелия He^{2+} с энергией 40 кэВ с флюенсами $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ изменения концентраций минимальны, благодаря уменьшению потока дефектов к местам поглощения. CoCrFeNi и CoCrFeMnNi обладают значительной устойчивостью к радиационной сегрегации.

Ключевые слова: Резерфордское 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. Kurahmedov¹⁾, 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 $^{14}\text{N}^{2+}$ 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 He^{2+} with energy 40 keV with fluences $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ and $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, 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°C 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 набуханию [5] при облучении гелием и тяжелыми ионами, обладают высокой коррозионной стойкостью [4, 6].

CoCrFeMnNi 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 $\Delta S_{\text{конф}} \geq 1.5R$, а для среднеэнтропийных сплавов (СЭС) $1.0 \leq \Delta S_{\text{конф}} \leq 1.5R$ [8], поэтому CoCrFeNi 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 Резерфордского 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°C в течение 24 ч. Полученные образцы подверглись холодной прокатке до уменьшения толщины слитков на 85%, и прошли отжиг при 1150°C в течение 72 ч.

Облучение CoCrFeNi и CoCrFeMnNi производилось на циклотроне ДЦ-60 (Астана, Казахстан) ионами He²⁺ с энергией 40 кэВ с флюенсами 5×10^{16} см⁻² и 2×10^{17} 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. Обратное 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 эксперименталь-

ных 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 методом RBS, для исходных и облученных сплавов CoCrFeNi и CoCrFeMnNi

Сплав	Концентрация элементов, ат. %				
	Ni	Co	Fe	Cr	Mn
CoCrFeNi (исходный)	17.9	28.9	26.2	26	–
CoCrFeNi (He ²⁺ , 5×10^{16} см ⁻²)	19.8	27.5	27.7	25	–
CoCrFeNi (He ²⁺ , 2×10^{17} см ⁻²)	18.5	31	25	25.5	–
CoCrFeMnNi (исходный)	17.9	22.3	17.9	20	21.9
CoCrFeMnNi (He ²⁺ , 5×10^{16} см ⁻²)	19.6	18.8	18.3	21.3	22
CoCrFeMnNi (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 ВЭС 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

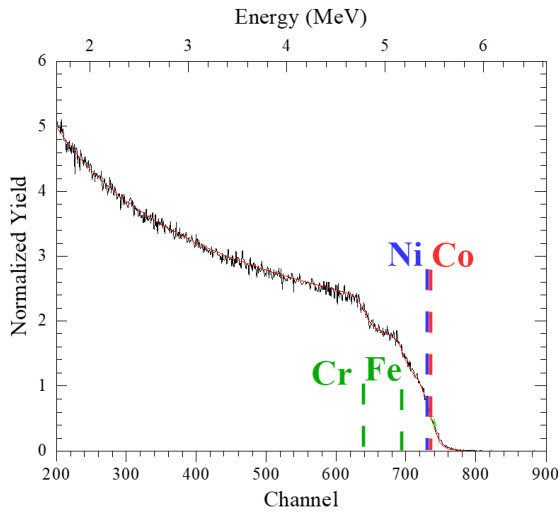


Рис. 1. Спектр RBS исходного сплава CoCrFeNi

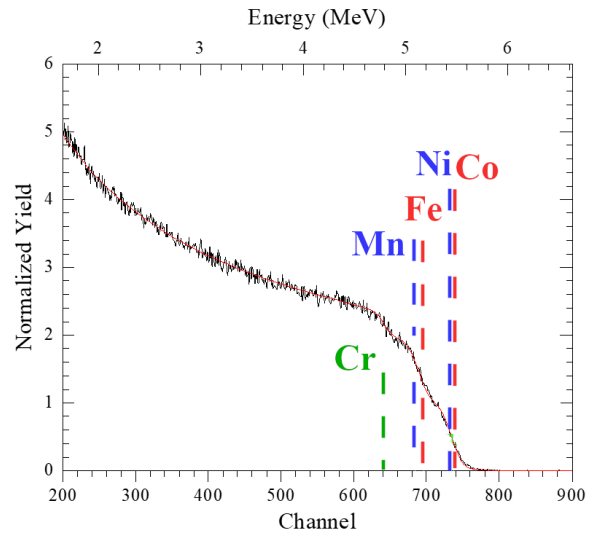


Рис. 4. Спектр RBS исходного сплава CoCrFeMnNi

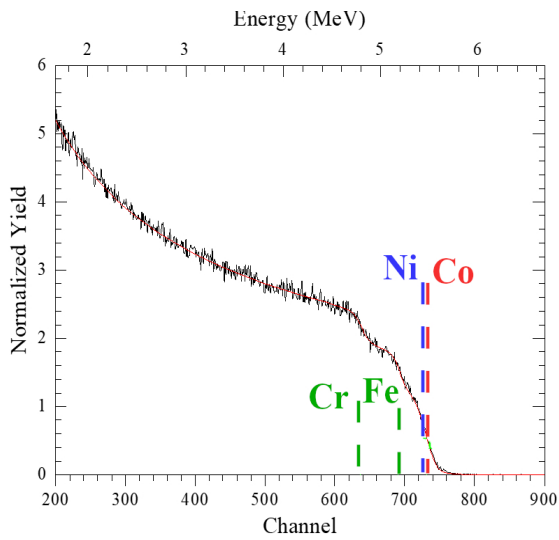


Рис. 2. Спектр RBS сплава CoCrFeNi облученного флюенсом $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

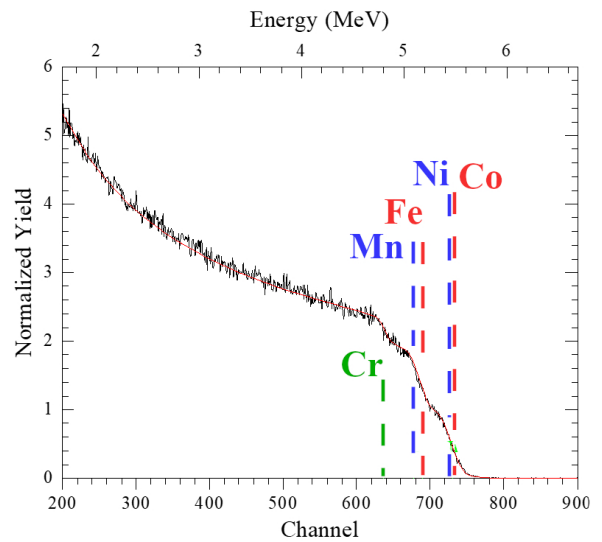


Рис. 5. Спектр RBS сплава CoCrFeMnNi облученного флюенсом $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

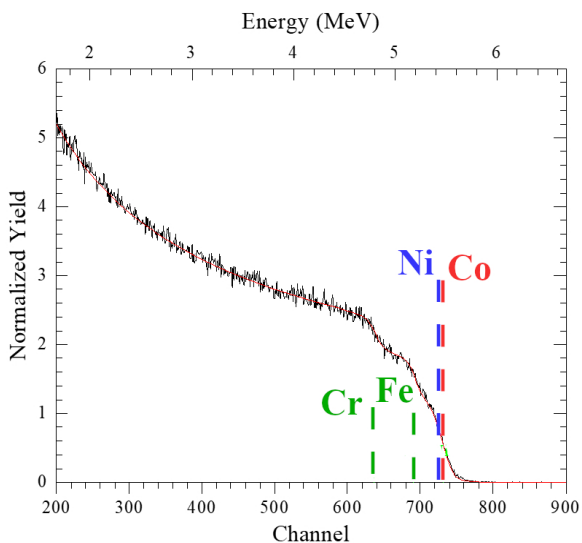


Рис. 3. Спектр RBS сплава CoCrFeNi облученного флюенсом $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

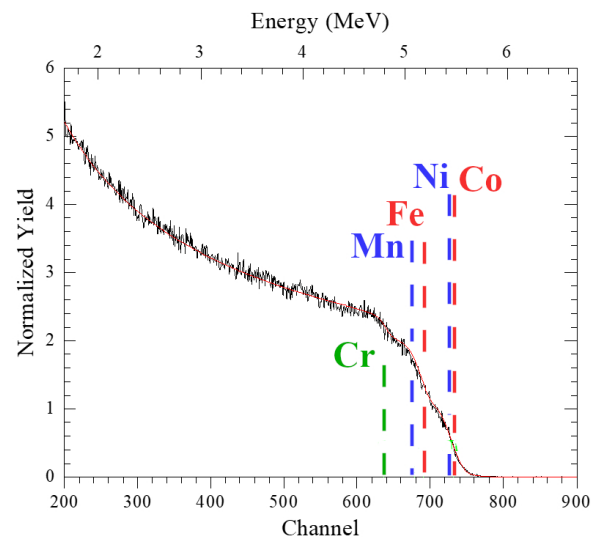


Рис. 6. Спектр RBS сплава CoCrFeMnNi облученного флюенсом $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$

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 AP14872199).

Библиографические ссылки

1. Воеводин В.Н. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века. *Вопросы атомной науки и техники*. 2007; (2):10–22.
2. Zinkle S.J., Tanigawa H., Wirth B.D. Radiation and Thermomechanical Degradation Effects in Reactor Structural Alloys. В: *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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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>
9. 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.