

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ

**Студенттер мен жас ғалымдардың
«GYLYM JÁNE BILIM - 2024»
XIX Халықаралық ғылыми конференциясының
БАЯНДАМАЛАР ЖИНАҒЫ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
XIX Международной научной конференции
студентов и молодых ученых
«GYLYM JÁNE BILIM - 2024»**

**PROCEEDINGS
of the XIX International Scientific Conference
for students and young scholars
«GYLYM JÁNE BILIM - 2024»**

**2024
Астана**

УДК 001

ББК 72

G99

«ǴYLYM JÁNE BILIM – 2024» студенттер мен жас ғалымдардың XIX Халықаралық ғылыми конференциясы = XIX Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ǴYLYM JÁNE BILIM – 2024» = The XIX International Scientific Conference for students and young scholars «ǴYLYM JÁNE BILIM – 2024». – Астана: – 7478 б. - қазақша, орысша, ағылшынша.

ISBN 978-601-7697-07-5

Жинаққа студенттердің, магистранттардың, докторанттардың және жас ғалымдардың жаратылыстану-техникалық және гуманитарлық ғылымдардың өзекті мәселелері бойынша баяндамалары енгізілген.

The proceedings are the papers of students, undergraduates, doctoral students and young researchers on topical issues of natural and technical sciences and humanities.

В сборник вошли доклады студентов, магистрантов, докторантов и молодых ученых по актуальным вопросам естественно-технических и гуманитарных наук.

УДК 001

ББК 72

G99

ISBN 978-601-7697-07-5

**©Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия
ұлттық университеті, 2024**

**ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОМ СПЛАВЕ NiCoFeCrMn ПРИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ**

Аманжулов Бауыржан Серикович

докторант кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий ЕНУ им. Л.Н.

Гумилева, Астана, Казахстан

amanzhulov_bs_1@enu.kz

Научный руководитель – к.ф.-м.н., профессор Здоровец М

Конструкционные материалы для реакторов IV поколения должны выдерживать радиационные повреждения до 100-200 сна (смещений на атом) [1], а по другим источникам - до 400-600 сна (около 80 лет работы реактора) [2], и повышенные температуры до 500-850°C [1][3]. Также, конструкционные материалы должны быть устойчивы к высоким механическим напряжениям, ползучести, коррозии, газовому набуханию, охрупчиванию и другим эффектам, возникающим при высоких температурах и радиационных дозах. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), основанные на переходных металлах Ni, Co, Fe, Cr, Mn могут быть перспективной альтернативой традиционным реакторным материалам, таким как аустенитные стали. Они обладают высокой прочностью и твердостью, и могут выдерживать высокие температуры и большие дозы радиации. ВЭС это сплав из пяти и более металлов, с равными или близкими атомными концентрациями основных элементов не менее 5-35 ат. %. ВЭС имеют конфигурационную энтропию $\Delta S_{\text{конф}} \geq 1.5R$, а для среднеэнтропийных сплавов (СЭС): $1.0 \leq \Delta S_{\text{конф}} \leq 1.5R$ [4].

Радиационная сегрегация, и пустотное набухание проявляются особенно сильно при достижении в 0.3-0.6 T_m , где T_m – температура плавления сплава [3][5][6]. Гелий, выделяемый во время реакций деления осаждается в металлических системах из-за малой растворимости, атомы He диффундируют и образуют кластеры с вакансиями формируя пузырьки. Считается, что при высоких температурах 773-973K и высокой энергии ионов гелия, диффузия гелия и образование пузырьков в ВЭС замедляется по сравнению с чистым Ni из-за подавления образования тепловых вакансий и усиления рекомбинации дефектов [7]. Гелиевые пузырьки могут вырасти в пустоты, приводя к блистерингу, который влияет на усталость конструкционных материалов [8]. Блистеринг – это образование крупных пузырей и отшелушивание поверхностного слоя образца-мишени, облученного ионами газов [9]. Поэтому важно изучить устойчивость к сегрегации и блистерингу ВЭС при высоких температурах, близких к температуре плавления.

В данном исследовании рассматриваются морфологические изменения и элементное распределение в ВЭС NiCoFeCrMn и чистом Ni, облученных низкоэнергетическими ионами гелия при температуре 700°C.

Сплав NiCoFeCrMn и Ni были изготовлены в Пекинском Технологическом Институте с помощью дуговой плавки порошков металлов Ni, Co, Fe, Cr, Mn в атмосфере аргона высокой чистоты. Затем полученные слитки отжигались при температуре 1150°C в течение 24 часов. Образцы дополнительно подвергались холодной прокатке для снижения толщины слитков до 15%, и прошли отжиг при 1150°C в течение 72 ч.

Ni и NiCoFeCrMn облучались на циклотроне ДЦ-60 (Астана, Казахстан) ионами He²⁺ с энергией 40 кэВ с флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ см⁻², и дополнительно флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ см⁻² ионов гелия два раза получая $6 \cdot 10^{17}$ см⁻² при температуре 700°C. Состав образцов и глубинное распределение элементов были анализированы на циклотроне ДЦ-60 методом RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) на пучке ионов ¹⁴N²⁺ с энергией 14 МэВ. Использовался полупроводниковый поверхностно-барьерный Au-Si детектор с площадью 50 мм² с разрешением энергии детектора ≈ 11 кэВ. Результаты RBS были обработаны в программе RUMP [Doolittle]. Относительная погрешность элементных концентраций сплавов равнялась

менее 6%. Также был произведен анализ морфологии поверхности с помощью Растровой Электронной Микроскопии (SEM) и энергодисперсионный анализ SEM-EDS состава на растровом электронном микроскопе Hitachi TM3030. Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ.

Результаты РЭМ на Рисунке 1 показали, что при малом флюенсе $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и 700°C в Ni заметны светлые пузырьки размером около 0.5 мкм, которые могут обозначать формирующиеся блистеры, но других кластеров дефектов не обнаружено. При облучении с флюенсом $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и 700°C в Ni образуются отдельные большие блистеры диаметром 3-5 мкм. В Ni при облучении флюенсом $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и 700°C образуются крупные блистеры до 5-7 мкм.

На Рисунке 1 также видно, что при облучении NiCoFeCrMn с флюенсом $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при нагреве до 700°C , в образце образуются блистеры диаметром до 400 нм. При флюенсах $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ начинают образовываться блистеры размером до 3 мкм, и видно множество точек похожих на поры. При флюенсе $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ образуются более крупные блистеры. В NiCoFeCrMn при флюенсе $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и выше образовались и другие крупные дефекты, похожие на не до конца разрушившийся блистер и осадки из Mn темного цвета, чью природу предстоит изучить. При высокой температуре и больших энергиях пузырьки не имеют четкой формы и размера, они вздуваются и идет отшелушивание части облученной поверхности. [9]. На снимке видно, что под вскрывшимися блистерами, структура поверхности повторяет структуру окружающей местности, и имеются черные точки, похожие на поры. Это соотносится с тем, что при низкой энергии ионов гелия и высокой температуре, пузырьки гелия могут образовать каналы и поверхность может стать пористой [9].

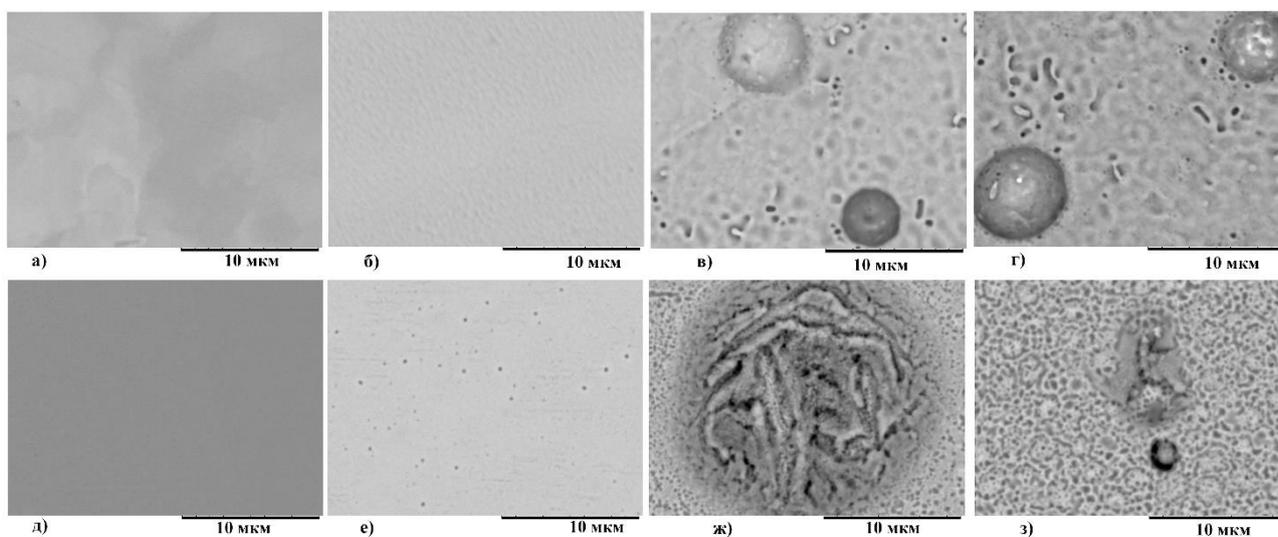


Рисунок 1. РЭМ изображения облученных ионами гелия с энергией 40 кэВ при температуре 700°C : а) необлученный Ni, д) необлученный NiCoFeCrMn; облученные Ni и NiCoFeCrMn при флюенсах ионов $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (б, е), $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (в, ж), $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (г, з).

Энергодисперсионный анализ SEM-EDS на Рисунке 2 показал, что в Ni при облучении с высокими дозами $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ в блистерах кроме никеля присутствуют пустоты и незначительная доля углерода. Пузырьки гелия накапливаются, образуются поры и пустоты, блистеры растут в размере в Ni. Крупные дефекты, обнаруженные в NiCoFeCrMn при флюенсах $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, содержат большую концентрацию марганца Mn и Cr. Эта сегрегация атомов вероятно связана с замедленной диффузией относительно Ni/Co/Fe и накоплением около данных кластеров дефектов. Результаты RBS на Рисунках 3 и 4 также показали увеличение концентрации Mn с 22 ат.% в исходном образце до 50 ат.%, увеличение хрома на 10 ат.% на глубине до 600 нм и сдвиг атомов железа на большую глубину в NiCoFeCrMn при облучении с флюенсом $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Согласно расчету SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) в другой работе [11] при облучении ионами гелия с флюенсом $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ концентрация имплантированных ионов гелия в NiCoFeCrMn увеличена на глубине 80-250 нм и достигает максимума около 15 ат.%. В других исследованиях при облучении ионами гелия с энергиями от 200 кэВ до 2 МэВ с флюенсами от $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и температурами 450-700°C в NiCoFeCrMn и FeCoNiCr образовывались гелиевые пузырьки размером 4-6 нм, что меньше чем в Ni, и блистеринга не происходило [7][12]. При высокотемпературном облучении с большей дозой ионов гелия, глубина и количество имплантированного гелия увеличится. Это может означать, что блистеринг в ВЭС также зависит и от флюенса ионов при облучении, так как усиливается имплантация и увеличивается время для образования дефектов.

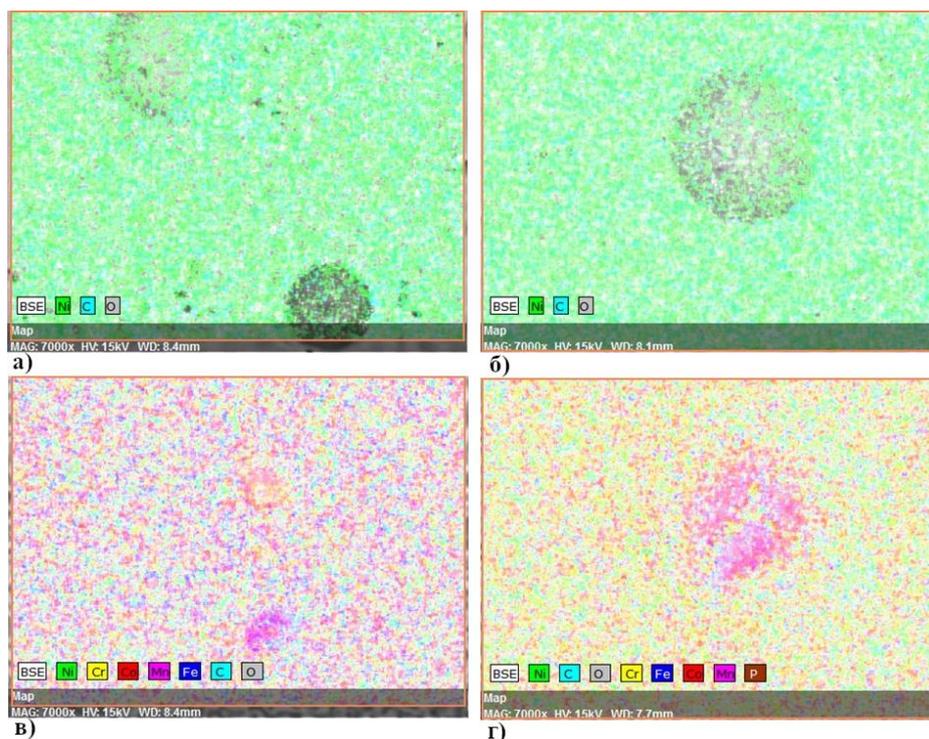


Рисунок 2. SEM-EDS карта около дефектов образцов облученных ионами гелия с энергией 40 кэВ при температуре 700°C: а) Ni при флюенсе $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, б) Ni при $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, в) NiCoFeCrMn при $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, г) NiCoFeCrMn при $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

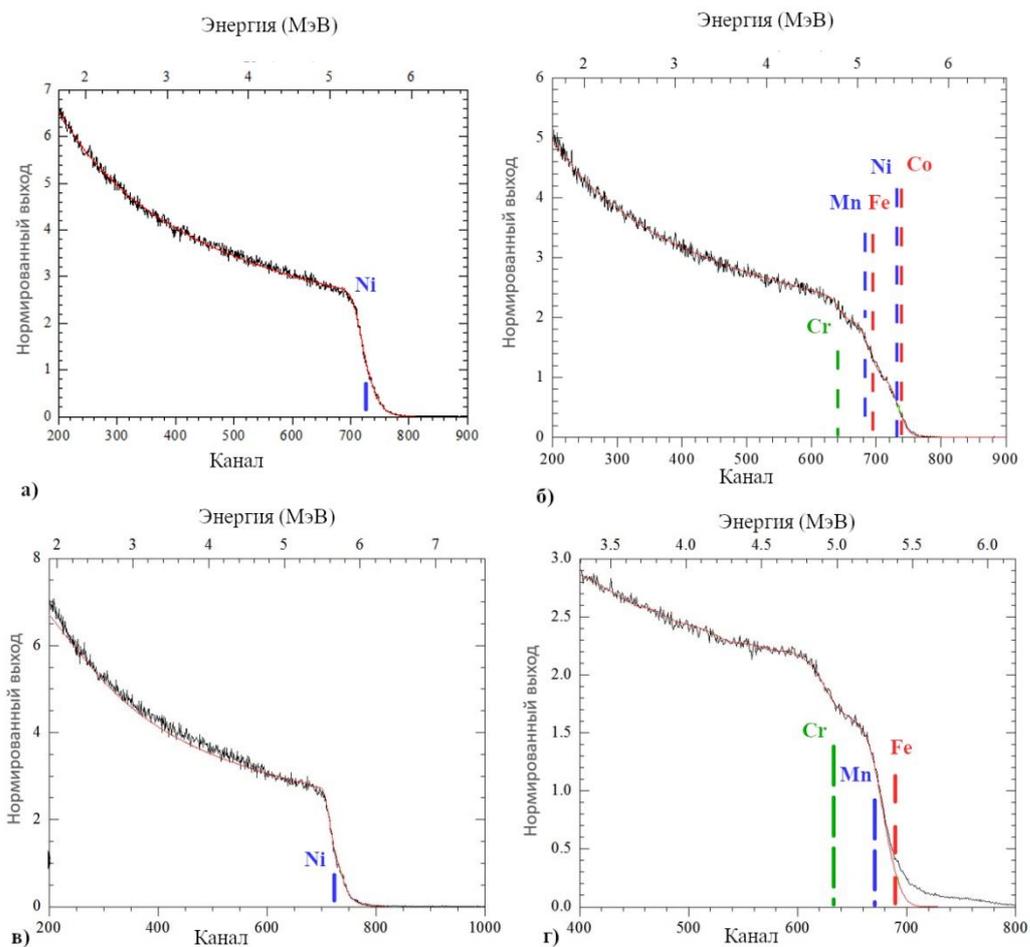


Рисунок 3. Спектры RBS: а) необлученный Ni, б) необлученный NiCoFeCrMn, в) и г) - Ni и NiCoFeCrMn, облученные ионами гелия с энергией 40 кэВ при температуре 700°C с флюенсом $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

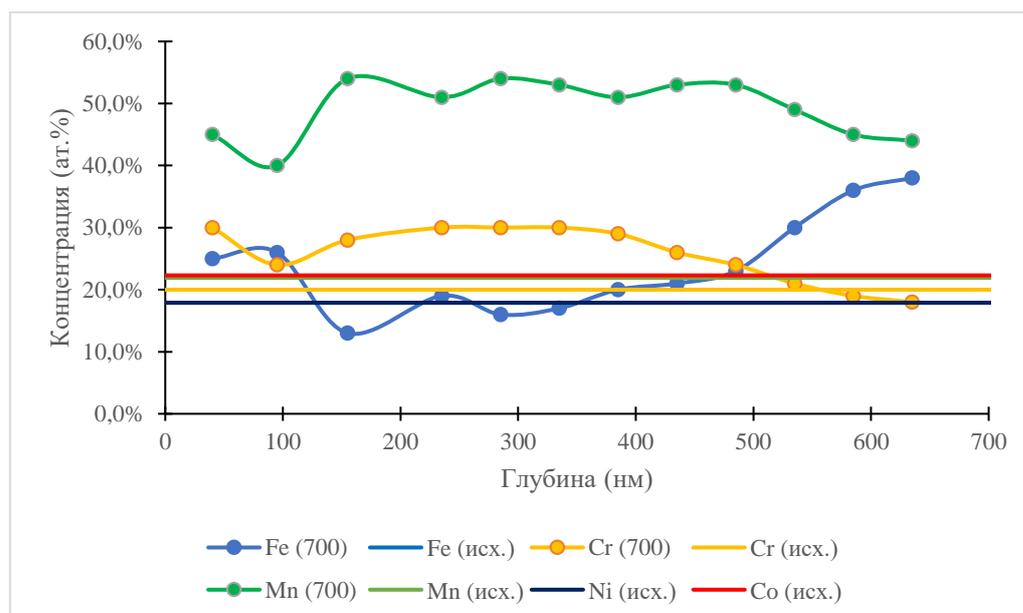


Рисунок 4. Концентрации элементов по глубине, полученные методом RBS: исходного NiCoFeCrMn и облученного ионами гелия с энергией 40 кэВ при температуре 700°C с флюенсом $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

В заключение, при облучении ВЭС NiCoFeCrMn и никеля ионами гелия при высокой температуре происходит образование блистеров и пор из-за большого количества имплантированного гелия, радиационных дефектов и сегрегации. Размер блистеров растёт с флюенсом. В NiCoFeCrMn образуются меньше круглых блистеров большого размера чем в никеле, но присутствуют другие крупные дефекты, такие как трещины и деформированные блистеры.

Список использованных источников

1. Воеводин В. Н. Конструкционные Материалы Ядерной Энергетики – Вызов 21 века // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. - № 2. – С. 10–22.
2. Zhang X., Hattar K., Chen Y., Shao L., Li J., Sun C., Yu K., Li N., Taheri M. L., Wang H., Wang J., Nastasi M. Radiation damage in nanostructured materials // Progress in Materials Science. - 2018. - Vol. 96. - P. 217–321.
3. Zinkle S. J., Tanigawa H., Wirth B. D. Radiation and Thermomechanical Degradation Effects in Reactor Structural Alloys // Structural Alloys for Nuclear Energy Applications: Elsevier, 2019. P. 163–210.
4. High-Entropy Alloys / ed. M. C. Gao, J.-W. Yeh, P. K. Liaw, Y. Zhang. Cham: Springer International Publishing, 2016. – 515 p.
5. Zhang Z., Armstrong D. E. J., Grant P. S. The effects of irradiation on CrMnFeCoNi high-entropy alloy and its derivatives // Progress in Materials Science. - 2022. - Vol. 123. - P. 100807.
6. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials // Journal of Nuclear Science and Technology. - 2013. - Vol. 50, № 3. - P. 213–254.
7. Chen D., Zhao S., Sun J., Tai P., Sheng Y., Zhao Y., Yeli G., Lin W., Liu S., Kai W., Kai J.-J. Diffusion controlled helium bubble formation resistance of FeCoNiCr high-entropy alloy in the half-melting temperature regime // Journal of Nuclear Materials. - 2019. - Vol. 526. - P. 151747.
8. Jossou E., Assefa T. A., Suzana A. F., Wu L., Campbell C., Harder R., Cha W., Kisslinger K., Sun C., Gan J., Ecker L., Robinson I. K., Gill S. K. Three-dimensional strain imaging of irradiated chromium using multi-reflection Bragg coherent diffraction // npj Materials Degradation. - 2022. - Vol. 6, № 1. - P. 99.
9. Мартыненко Ю. В. Теория блистеринга / Ю. В. Мартыненко. – Москва: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1979. – 40 с.
10. 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. - Vol. 9, № 3. - P. 344–351.
11. Amanzhulov B., Ivanov I., Uglov V., Zlotski S., Ryskulov A., Kurakhmedov A., Koloberdin M., Zdorovets M. Composition and Structure of NiCoFeCr and NiCoFeCrMn High-Entropy Alloys Irradiated by Helium Ions // Materials. - 2023. - Vol. 16, № 10. - P. 3695.
12. Yang L., Ge H., Zhang J., Xiong T., Jin Q., Zhou Y., Shao X., Zhang B., Zhu Z., Zheng S., Ma X. High He-ion irradiation resistance of CrMnFeCoNi high-entropy alloy revealed by comparison study with Ni and 304SS // Journal of Materials Science & Technology. - 2019. - Vol. 35, № 3. - P. 300–305.