

ЭКСПРЕССНЫЙ УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С.В. Рогожкин¹, Т.В. Кулевой¹, А.Г. Залужный¹, А.А. Никитин¹, Н.А. Искандаров¹,
А.А. Хомич¹, П.А. Федин¹, В.В. Хорошилов¹, А.А. Богачев¹, А.А. Лукьянчук¹,
О.А. Разницын¹, А.С. Шутов¹, А.Л. Васильев², М.Ю. Пресняков²

¹НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ

²НИЦ «Курчатовский институт»

Впервые в России проведен детальный анализ причин низкотемпературного радиационного охрупчивания и упрочнения перспективных ферритно-мартенситных сталей, разрабатываемых в качестве материалов активной зоны ядерных энергетических установок. Применение методики экспресс-анализа радиационной стойкости на пучках ионов позволило охватить широкий диапазон температур от 250 до 450°C и применить наиболее современные методики просвечивающей микроскопии и атомно-зондовой томографии и обнаружить тонкие структурно-фазовые изменения на ранних стадиях деградации. Выявлена критическая роль ряда примесей и легирующих добавок, приводящих к множественному формированию радиационно-индуцированных кластеров и сегрегаций, и, как следствие, и усиленному охрупчиванию ферритно-мартенситных сталей.

В работе впервые проведены комплексные исследования наноразмерных эффектов радиационного упрочнения перспективных материалов активной зоны ядерных энергетических установок: малоактивируемых сталей Eurofer 97, ЭК-181 и обычной ферритно-мартенситной стали ЧС-139. Радиационные повреждения моделировались с помощью пучка ионов Fe с энергией 5.6 МэВ в диапазоне температур 250-450°C, а анализ радиационно-индуцированных эффектов проводился методами просвечивающей электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии и наноиндентирования. Исследование облученных образцов с помощью ПЭМ/ПРЭМ показало, что одной из микроскопических причин радиационного упрочнения являются дислокационные петли размером 5-20 нм и плотностью $\sim(1-7)\times 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Кроме того, АЗТ анализ выявил значительные изменения в наноструктуре облученных образцов, которые отличались в исследуемых сталях из-за различий в их химическом составе. В Eurofer 97 обнаружена

только начальная стадия распада твердого раствора Fe-Cr после облучения при 400°C. Было обнаружено образование радиационно-индуцированных кластеров легирующих элементов: Si-кластеров в ЭК-181 с плотностью $\sim 10^{22} - 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и размерами 3-11 нм, Ni-Si-Mn-кластеров в стали ЧС-139 с плотностью $\sim (8-20) \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и размерами 2-7 нм.

Полученные результаты демонстрируют, что формирование дислокационных петель играет основную роль при низкотемпературном радиационном упрочнении Eurofer 97 до 5-6 сна. Радиационная стойкость ЭК-181 при этой дозе такая же, как у Eurofer 97 ($\sim 150-200 \text{ МПа}$), и вызвана дислокационными петлями и небольшим числом продолговатых кластеров, обогащенных по Si. Однако в стали ЧС-139 по сравнению с ЭК-181 и Eurofer 97, образование Ni-Si-Mn кластеров и атмосфер Коттрелла оказывает более существенное влияние на упрочнение ($\sim 500-650 \text{ МПа}$), чем дислокационные петли.

Выявленные различия в малоактивируемых сталях Eurofer 97 и ЭК-181 можно объяснить различием в концентрации Si. Значительно большее радиационное упрочнение (более чем в 2 раза) в обычной стали ЧС-139 по сравнению с исследуемыми сталями малоактивируемыми сталями при 250-400°C в диапазоне доз до 6 сна было обусловлено содержанием никеля в стали ЧС-139 с концентрацией 0,7 ат.% инициировало зарождение большого количества радиационно-индуцированных кластеров. Полученные в настоящей работе результаты демонстрируют, что подбор системы легирования, обеспечивающий пониженную активацию сталей, также может способствовать повышению стабильности твердого раствора сталей под облучением.

Публикации.

1. С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Хомич, Н.А. Искандаров, В.В. Хорошилов, А.А. Богачев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, П.А. Федин, Р.П. Куйбида, Т.В. Кулевой, А.Л. Васильев, М.Ю. Пресняков, К.С. Кравчук, А.С. Усеинов, Имитационные эксперименты на пучках тяжелых ионов для моделирования радиационных повреждений конструкционных материалов активной зоны ядерных и термоядерных энергетических установок. Ядерная физика и инжиниринг, 2018, Т. 9, № 3, с. 245-258. DOI: 10.1134/S2079562918030120. ПЕРЕВОД: S. V. Rogozhkin, A. A. Nikitin, A. A. Khomich, N. A. Iskandarov, V. V. Khoroshilov, A. A. Bogachev, A. A. Lukyanchuk, O. A. Raznitsyn, A. S. Shutov, P. A. Fedin, R. P. Kuibeda, T. V. Kulevoy, A. L. Vasiliev, M. Yu. Presniakov, K. S. Kravchuk, and A. S. Useinov, Emulation of Radiation Damage of Structural Materials for Fission and Fusion Power Plants Using Heavy Ion Beams, Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol. 82, No. 9, pp. 1239–1251, DOI: 10.1134/S1063778819090072
2. С.В. Рогожкин, Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, А.А. Хомич, В.В. Хорошилов, А.А. Богачев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, Т.В. Кулевой, П.А. Федин, А.Л. Васильев, М.Ю. Пресняков, М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.М. Можанов, А.А. Никитина, Исследование микроскопических причин радиационного упрочнения

- сталей ЭК-181 и ЧС-139 с помощью имитационного облучения ионами, Перспективные материалы, 2019, № 12, с. 39-51, ПЕРЕВОД: S. V. Rogozhkin, N. A. Iskandarov, A. A. Nikitin, A. A. Khomich, V. V. Khoroshilov, A. A. Bogachev, A. A. Lukyanchuk, O. A. Raznitsyn, A. S. Shutov, T. V. Kulevoy, P. A. Fedin, A. L. Vasiliev, M. Yu. Presnyakov, M. V. Leontyeva-Smirnova, E. M. Mozhanov, and A. A. Nikitina, Study of the microscopic origins of radiation hardening of ferritic-martensitic steels RUSFER-EK-181 and ChS-139 in the simulation experiment with heavy ion irradiation, Inorganic Materials: Applied Research, 2020, Vol. 11, No. 2, pp. 359–365. DOI: 10.1134/S207511332002032X
3. С.В. Рогожкин, Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, А.А. Хомич, В.В. Хорошилов, А.А. Богачев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, Т.В. Кулевой, П.А. Федин, А.Г. Залужный, Сегрегация легирующих элементов на малоугловые границы в ферритно-мартенситных сталях при облучении ионами, Перспективные материалы, 2020, №5, с. 38-50, DOI: 10.30791/1028-978X-2020-5-38-50, ПЕРЕВОД: S.V. Rogozhkin, N.A. Iskandarov, A.A. Nikitin, A.A. Khomich, V.V. Khoroshilov, A.A. Bogachev, A. A. Lukyanchuk, O. A. Raznitsyn, A. S. Shutov, T.V. Kulevoy, P.A. Fedin, A.G. Zaluzhnyi. Segregation of Alloying Elements on Small-Angle Grain Boundaries in Ferritic-Martensitic Steels under Ion Irradiation, Inorganic Materials: Applied Research, 2020, Vol. 11, No. 5, pp. 1103–1109. DOI: 10.1134/S2075113320050275
 4. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искандаров Н.А., Хорошилов В.В., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю. Исследование микроскопических причин радиационного упрочнения стали Eurofer 97 с помощью имитационного облучения ионами, Перспективные материалы, 2018, № 10, с. 25-34, DOI: 10.30791/1028-978X-2018-10-25-34 Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Khomich A.A., Iskandarov N.A., Khoroshilov V.V., Bogachev A.A., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Kulevoy T.V., Fedin P.A., Vasiliev A.L., Presnyakov M.Yu., Study of microscopic origins of radiation hardening of Eurofer 97 in simulation experiment with ion irradiation. Inorganic materials: Applied research, 2019, Vol. 10, No. 2, pp. 333-338. DOI: 10.1134/S2075113319020357
 5. Никитин А.А., Рогожкин С.В., Кулевой Т.В., Федин П.А., Искандаров Н.А., Кравчук К.С., Гладких Е.В., М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.М. Можанов, ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ. Металлы, 2019, № 9, С. 41- 47. ПЕРЕВОД: А.А. Nikitin, S.V. Rogozhkina, T.V. Kulevoi, P.A. Fedin, N.A. Iskandarov, K.S. Kravchuk, E. V. Gladkikh, M.V. Leont'eva-Smirnova, and E.M. Mozhanov, Nanoindentation Study of the Effect of Low-Temperature Ion Irradiation on the Hardness of a Ferritic–Martensitic

- EK-181 Steel. Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2019, No. 11, pp. 1184–1189. DOI: 10.1134/S0036029519110077
6. С.В. Рогожкин, Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, А.А. Богачев, А.А. Хомич, В.В. Хорошилов, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, П.А. Федин, Т.В. Кулевой, М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.М. Можанов, Перестройка наноструктуры 12%-й хромистой стали ЧС-139 при низкотемпературном облучении ионами. Перспективные материалы, 2019, № 5, с 15-27 DOI: 10.30791/1028-978X-2019-5-15-27, ПЕРЕВОД: S.V. Rogozhkin, N.A. Iskandarov, A.A. Nikitin, A.A. Bogachev, A.A. Khomich, V. V. Khoroshilov, A.A. Lukyanchuk, O.A. Raznitsyn, A.S. Shutov, P.A. Fedin, T.V. Kulevoy, M.V. Leontyeva-Smirnova, E.M. Mozhanov, Effect of low-temperature ion irradiation on the nanostructure of 12% chromium ChS-139 steel, Inorganic Materials: Applied Research, 2019, Vol. 10, No. 5, pp. 1078–1084, DOI: 10.1134/S2075113319050289
 7. S.V. Rogozhkin, A.A. Nikitin, A.A. Khomich, A.A. Lukyanchuk, O.A. Raznitsyn, A.S. Shutov, P.A. Fedin, T.V. Kulevoy, A.L. Vasiliev, M.Yu. Presniakov, A. Möeslang, R. Lindau, P. Vladimirov, The influence of Fe-ion irradiation on the microstructure of reduced activation ferritic-martensitic steel Eurofer 97, Nuclear Fusion, 2019, V. 59, 086018 (6pp), DOI: 10.1088/1741-4326/ab1e18
 8. С.В. Рогожкин, Н.А. Искандаров, А.А. Лукьянчук, А.С. Шутов, О.А. Разницын, А.А. Никитин, А.Г. Залужный, Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, С.Л. Андрианов, М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.М. Можанов, А.А. Никитина, Исследование наноструктуры ферритно-мартенситной стали ЧС-139 в исходном состоянии и после облучения ионами Fe. Перспективные материалы, 2017, № 11, с. 5-17. ПЕРЕВОД: S.V. Rogozhkin, N.A. Iskandarov, A.A. Lukyanchuk, A.S. Shutov, O.A. Raznitsyn, A.A. Nikitin, A.G. Zaluzhnyi, T.V. Kulevoy, R. P. Kuibida, S.L. Andrianov, M.V. Leontyeva-Smirnova, E.M. Mozhanov, A.A. Nikitina, Study of Nanostructure of Ferritic-Martensitic Steel ChS-139 in initial state and after Fe Ion Irradiation. Inorganic materials: Applied research, 2018, Vol. 9, No. 2, pp. 231–238. DOI: 10.1134/S2075113318020247
 9. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искандаров Н.А., Хорошилов В.В., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю. Исследование микроскопических причин радиационного упрочнения стали Eurofer 97 с помощью имитационного облучения ионами, Перспективные материалы, 2018, № 10, с. 25-34, DOI: 10.30791/1028-978X-2018-10-25-34, ПЕРЕВОД: Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Khomich A.A., Iskandarov N.A., Khoroshilov V.V., Bogachev A.A., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Kulevoy T.V., Fedin P.A., Vasiliev A.L., Presnyakov M.Yu., STUDY OF MICROSCOPIC ORIGINS OF RADIATION HARDENING OF EUROFER 97 IN

