

РАДИАЦИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ОДНОРОДНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Нгуен Ван Тьеп^{1), 2)}, Е.А. Корнеева¹⁾, А.С. Сохатский¹⁾, В.А. Скуратов^{1), 3), 4)},
С.В. Митрофанов¹⁾, Д.А. Комарова¹⁾, М. Нкоси⁵⁾

¹⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, Россия,
nvtiepvly@gmail.com, korneeva@jinr.ru, sohatsky@jinr.ru, skuratov@jinr.ru,
mitrfanov@jinr.ru, dianakomarova@jinr.ru,

²⁾Институт физики, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам

³⁾Национальный исследовательский институт «МИФИ», Москва, Россия

⁴⁾Университет Дубна, Дубна, Московская область, Россия

⁵⁾Лаборатория ионно-ускорительных исследований iThemba (iThemba LABS),
Кейптаун, ЮАР, *m.nkosi@ilabs.nrf.ac.za*

Проведено исследование радиационной стойкости аустенитных сталей ЭИ847 и ЭП753 в условиях однородного облучения ионами гелия с энергией 3 МэВ. Пострадиационный отжиг выявил формирование дислокационных петель междуузельного типа. Радиационное упрочнение демонстрирует монотонный рост до доз облучения 0,1 сна, что коррелирует с увеличением плотности дислокационных петель. При дальнейшем увеличении дозы повреждений наблюдается взаимодействие различных типов радиационных дефектов, приводящее к стабилизации микроструктуры и замедлению темпов упрочнения. Сталь ЭИ847 характеризуется более высоким уровнем радиационного упрочнения по сравнению с ЭП753, что подтверждает роль никеля в механизмах образования, роста и эволюции радиационно-индуцированных дефектов в аустенитных сталях.

Ключевые слова: аустенитные стали; облучение гелием; дислокационные петли; радиационные дефекты; радиационное упрочнение.

RADIATION DAMAGE OF AUSTENITIC ALLOYS UNDER HOMOGENEOUS HELIUM ION IRRADIATION

Nguyen Van Tiep^{1), 2)}, E.A. Korneeva¹⁾, A.S. Sokhatsky¹⁾, V.A. Skuratov^{1), 3), 4)},
S.V. Mitrofanov¹⁾, D.A. Komarova¹⁾, M. Nkosi⁵⁾

¹⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russia,
nvtiepvly@gmail.com, korneeva@jinr.ru, sohatsky@jinr.ru, skuratov@jinr.ru,
mitrfanov@jinr.ru, dianakomarova@jinr.ru

²⁾Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

³⁾National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

⁴⁾Dubna University, Dubna, Moscow Region, Russia

⁵⁾Material Research Department, NRF-iThemba LABS, Somerset West, South Africa,
m.nkosi@ilabs.nrf.ac.za

In the present work, investigation of radiation resistance was conducted on austenitic steels EI847 and EP753 with different initial microstructures under conditions of high point defect density creation during excessive helium implantation, when the appm He/dpa>1000. The microstructural investigation and radiation hardening assessment were performed in the region of homogeneous helium profile. Post-irradiation annealing revealed the formation of high-density dislocation loops, more 10^{18} cm^{-3} . The dislocation loop formation represents a critical aspect of radiation-induced microstructural changes that directly impacts mechanical properties. The experimental results demonstrated that radiation hardening monotonically grows up to damage doses of 0.1 dpa, that directly correlates with increasing dislocation loop density. With further increases of irradiation dose, the interplay between various types of radiation defects results in stabilization of structure and a deceleration of hardening rate. Steel EI847 with 15% nickel content has demonstrated higher radiation hardening level compared to EP753, thus confirming the critical role of nickel concentration in formation, growth, and evolution of radiation-induced defects in austenitic steels.

Keywords: austenitic steels; helium irradiation; dislocation loops; radiation defects; irradiation hardening.

Введение

С помощью однородной ионной имплантации гелия в металл (атНе/млн./сна>1000) возможно создать условия, при которых эффективность введения радиационных дефектов будет значительно выше, чем при традиционно применяемых методах моделирования реакторного облучения [1, 2].

При таком типе облучения усиление зарождения и роста кластеров точечных дефектов и междуузельных дислокационных петель обеспечивается захватом и сохранением радиационных вакансий в гелий-вакансационных комплексах, гомогенно распределенных во всем облучаемом объеме материала.

Целью настоящей работы было исследование роли избыточного содержания внедренного гелия и его роли в процессах дефектообразования в модельных аустенитных сталях.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были взяты две аустенитные стали с составом 06С-Fe-16Cr-15Ni-3Mo-1Nb (ЭИ847) и 18Cr-40Ni-5Mo-Mn-Nb (ЭП753) и исходной микроструктурой, характеризующейся большими размерами зерен и минимальной исходной плотностью дислокаций.

Однородное облучение образцов ионами He^{2+} с энергией 3 МэВ проводилось в iThemba LABS (ЮАР) согласно методологии [3] при температуре образцов менее 50⁰С.

Исследования структуры и свойств проводились на 3мм дисках, которые были предварительно утонены до области однородного легирования гелием. Исследования микроструктуры проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа Talos F200i S/TEM. Измерения нанотвердости проводились на приборе NanoScan-4D (ФГБНУ ТИСНУМ).

Результаты

В результате облучения ионами He^{2+} в структуре наблюдалось формирование зародышей дислокационных петель малого размера (~1 нм) с высокой объемной плотностью >10¹⁸ см⁻³. Для проявления дефектной структуры до измеряемого состояния был проведен пострадиационный отжиг облученных образцов при 500⁰С-30', в результате которого можно было наблюдать дислокационные петли большего размера (~6 нм) и уменьшенной плотности.

ПЭМ анализ показал, что данные дефекты являются междуузельными петлями Франка с вектором Бюргерса 1/3<111>. Измерение петель в образцах, облученных различными дозами с различной скоростью повреждения показало, что линейная плотность дислокаций, формирующаяся при описанном способе облучения за единицу дозы (м/м³/сна), существенно превышает аналогичную величину для нейтронного и обычного ионного повреждающего облучений [1, 2] (рис. 1). Причем, эффективность формирования дислокаций при облучении гелием не зависит также от мощности дозы в диапазоне 8x10⁻⁶ - 10⁻³ сна/с. Наблюдаемый характер изменения плотности дислокационных петель с дозой облучения хорошо согласуется с полученными результатами по радиационному упрочнению (рис. 2).

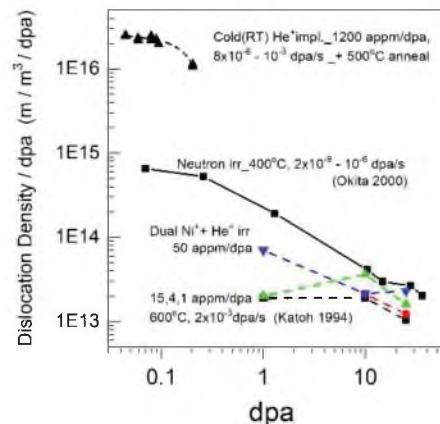


Рис. 1. Зависимость плотности дислокаций от дозы облучения

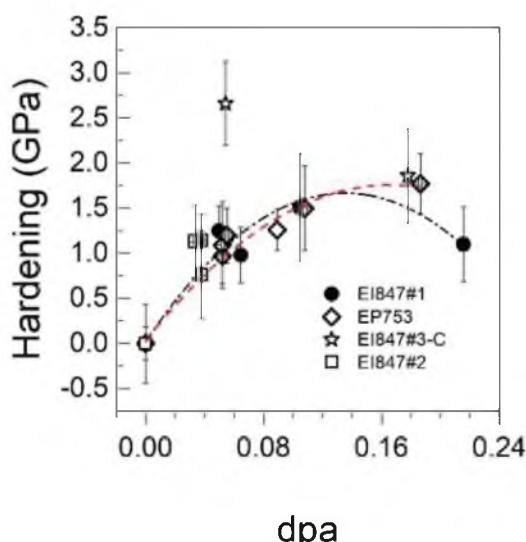


Рис. 2. Радиационное упрочнение в зависимости от дозы облучения для разных типов сталей

Можно видеть, что, как в упрочнении, так и в плотности дислокаций существуют некоторые критические значения (при дозе облучения около 0.1 сна), до которых наблюдается линейный рост эффекта, а при достижении наблюдаются снижение упрочнения и соответствующее ему снижение плотности дислокаций. Стоит заметить, что разница в уровне упрочнения между сплавами ЭИ847 и ЭП753 так же, как и разница в плотности дислокаций в них, согласуются с представлением о роли содержания никеля в дефектообразовании в аустенитных сталях [4].

Заключение

Однородное «холодное» облучение аустенитных сталей ионами гелия при комнатной температуре приводит к формированию в них высокой плотности дис-

локационных петель, являющихся причиной значительного радиационного упрочнения материалов. Примечательно, что данный сильный радиационный эффект имеет место при незначительных дозах радиационного повреждения, порядка 0.1 сна, меньших, чем дозы для получения аналогичного эффекта в случаях нейтронного или ионного облучения.

Показано, что причиной эффекта является избыточная концентрация внедренного гелия, обеспечивающего сохранение вакансий и, тем самым, создающая искусственное междуузельное пересыщение.

Библиографические ссылки

1. Katoh Y., Stoller R.E., Kohno Y., Kohyama A. The influence of He/dpa ratio and displacement rate on microstructural evolution: a comparison of theory and experiment. *Journal of Nuclear Materials* 1994; 210: 290-302.
2. Ma Z., Ran G., Qiu X., Li Y.P., Ding Y., Zhang R. et al. In-situ TEM investigation of dislocation loop evolution in Al-forming austenitic stainless steels during Fe⁺ irradiation: Effects of irradiation dose and pre-existing dislocations. *Journal of Nuclear Materials* 2022; 563: 153645
3. Sohatsky A.S., Komarova D.A., Nguyen T.V., Skuratov V.A., Mitrofanov S.V., Khumalo Z.M., et al. Novel methodology of homogeneous ion doping/damage of nuclear materials for structural characterization. *Journal of Nuclear Materials* 2025; 606: 155601.
4. Кулешова Е.А., Мальцев Д.А., Фролов А.С., Степанов Н.В., Марголин Б.З., Сорокин А.А. и др. Оценка профиля распускания аустенитной нержавеющей стали с различным содержанием никеля под действием ионного облучения. *Вопросы материаловедения* 2022; 110(2): 28.