

УДК 669.017

DOI: 10.17223/00213411/62/12/187

С.О. АКАЕВ^{1,2}, А.С. ДИКОВ¹, С.Б. КИСЛИЦИН^{1,3}, А.С. ЛАРИОНОВ¹**ОХРУПЧИВАНИЕ СТАЛИ X18H10T, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ В СРЕДЕ ГЕЛИЯ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ *****Ключевые слова:** охрупчивание, нейтронное облучение, гелий, структура стали.

Одним из факторов, ограничивающих работоспособность конструкционных материалов в активной зоне ядерных реакторов и термоядерных установках, является высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО) материалов, способное привести к хрупкому разрушению с катастрофическими последствиями. Существует две точки зрения на механизм ВТРО [1, 2]. Одна связывает охрупчивание с накоплением гелия в облученном материале, который образуется в результате ядерных реакций и концентрируется возле границ зерен, тем самым ослабляя их. Другая связывает механизм ВТРО с процессом сегрегации примесных (легированных) атомов на границе. Явление ВТРО достаточно широко изучалось как после облучения нейтронами, так и α -частицами [1, 2]. Известно, что ВТРО в облученных нейтронами сталях проявляется при температурах испытаний выше 600 °С, является межзеренным и носит необратимый характер. При нейтронном облучении стали гелий накапливается за счет ядерных реакций при взаимодействии нейтронов с атомами никеля. Однако однозначно выявить роль гелия при нейтронном облучении не удастся, поскольку в температурном интервале ВТРО идет активная диффузия примесей, которые также осаждаются на границах зерен и других дефектах структуры.

Для выявления роли гелия в охрупчивании предпринято следующее: проведены исследования изменений прочностных свойств и структуры конструкционной стали X18H10T после нейтронного облучения в атмосфере гелия. Изготовленные из стали X18H10T наполненные гелием ампулы (давление газа составляло ~ 0.3 атм.) облучались в исследовательском реакторе ВВР-К (ИЯФ, г. Алматы) при температуре 760 °С. Толщина стенок ампулы – 2 мм. Облучение проводилось до флюенса $9 \cdot 10^{19}$ н/см² (энергия нейтронов 0.1 МэВ) при плотности нейтронного потока $7.6 \cdot 10^{12}$ н/(с·см²). Разогрев ампулы осуществлялся только за счет облучения. Сами ампулы помещались в заполненный воздухом герметичный пенал, т.е. теплоотвод был незначительным. Отметим, что набранный флюенс нейтронов (облучение проводилось более 100 дней) соответствует дозе облучения < 1 сна. Подробно процедура облучения изложена в [3].

После облучения проводилась разделка ампулы и из стенок готовились образцы для исследований методом сканирующей (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии, механических испытаний на одноосное растяжение (пластины размерами 20×2×0.5 мм) и термодесорбционной спектроскопии (ТДС). Исследования накопления гелия в стали за счет «вбивания» атомов гелия из атмосферы методом ТДС показали наличие трех пиков десорбции в интервале температур от комнатной до 400 °С [3]. Сравнивая ТДС-спектры выхода гелия из стали, облученной в среде гелия и имплантированной α -частицами [4], можно предположить, что гелий аккумулируется в приповерхностных слоях и концентрируется на дефектах структуры, таких, как границы зерен, дислокации. Следов блистеров не отмечено, хотя, по оценкам, концентрации гелия при нейтронном облучении в среде гелия и имплантации гелия на ускорителе сопоставимы. Причиной является то, что при имплантации α -частиц распределение вакансий и пробег атомов гелия близки, и это создает условия для зарождения и роста газонаполненных пор в отличие от нейтронного облучения в среде гелия.

Результаты механических испытаний показаны на рис. 1, где приведена температурная зависимость характеристик прочности и пластичности стали, облученной нейтронами в среде гелия. Из рис. 1 видно, что с повышением температуры наблюдается снижение пластичности материала. Так, при температуре 450 °С пластичность стали снижается на 18 %, а при температуре, соответствующей облучению (760 °С), – на 53 %. При этом условный предел текучести при температуре 760 °С снижается на 56 %, что указывает на охрупчивание стали. Кроме механических свойств, исследована структура облученной стали методами СЭМ и ПЭМ. Из рис. 2, а, где показана структура поверхности облученной стали, видно, что структура стали характеризуется разнотекстурностью. Средний диаметр зерна составляет 10 мкм, максимальный – не превышает 20 мкм, минимальный ~ 5 мкм. В теле аустенитных зерен наблюдается большое количество вторичных выделений карбидов разного размера и состава. Элементный анализ показал, что основу карбидов составляют Cr, Fe, Ni, а также Ti. В зависимости от состава и концентраций установлено, что карбиды соответствуют MC, M₃C, M₂₃C₆, где М – металл.

Результаты ПЭМ-исследования, полученные как в стационарном режиме, так и в режиме STEM (см. вставку) показаны на рис. 2, б.

* Работа выполнена в рамках Программы целевого финансирования МОН РК № BR05236400.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>