

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 08X16H11M3, ОБЛУЧЕННОЙ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ БН-350

К.К. Кадыржанов¹⁾, О.Г. Романенко²⁾, Т.Э. Туркбаев¹⁾, О.П. Максимкин¹⁾, С.Б. Кислицин¹⁾,
Е.В. Чумаков¹⁾

¹⁾Институт ядерной физики Национального центра республики Казахстан, 480082, Казахстан, г. Алма-Ата, ул. Ибрагимов 1, 7(3272)546467, 7(3272)546517, e-mail: skislitsin@inp.kz

²⁾Центр безопасности ядерных технологий, 480020 Казахстан, г. Алма-Ата, ул. Лизы Чайкиной, 4, 7(3272)646801, 7(3272)646801, e-mail: romanenko@ntsc.kz

В работе приведены результаты комплексных исследований структуры и механических свойств нержавеющей стали 08X16H11M3, материала чехла отработанной тепловыделяющей сборки Н-214 реактора БН-350. Для образцов с отметок (-1200, -900, -500, 0, +500) мм по отношению к центру активной зоны проведены исследования структуры методами оптической металлографии (ОМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), рентгеноструктурного анализа (РСА) и механические испытания (МИ) методом статического растяжения. Структурные исследования показали, что во всех исследуемых образцах стали наблюдается разнородность, и, по-видимому, это связано с исходным (до облучения) состоянием материала чехла. Установлено, что в изучаемых образцах, для отметок "-500", "0" и "+500" наблюдается пористость. Рассчитанная по концентрации зафиксированных в ПЭМ пор и распределению их по размерам, величина распухания не превышает 0.5%. Пороговая доза формирования пористости составляет ~ 7 смещений на атом при температуре облучения 309°C. Как следует из полученных данных, с увеличением температуры облучения пороговая доза образования пор уменьшается. Зависимость изменения механических свойств исследуемого материала от дозы облучения имеет обычный для облучаемых металлических материалов характер демонстрируя стадию радиационного упрочнения.

Введение

Значительный интерес к исследованию конструкционных материалов активной зоны реакторов на быстрых нейтронах вызван несколькими обстоятельствами:

- Сравнительно небольшим количеством экспериментальных данных по высокодозному облучению элементов конструкций активной зоны реактора,
- Возможностью применения данных по радиационной повреждаемости конструкционных материалов реакторов на быстрых нейтронах (в особенности это касается реактора БН-350, конструктивным отличием которого является сравнительно низкая температура жидкого натрия, используемого в качестве теплоносителя) для выработки решений по продлению срока службы легководных реакторов, и др.

В настоящей работе приведены новые результаты комплексного исследования изменения структуры и механических свойств нержавеющей стали 08X16H11M3 – материала чехла отработанной тепловыделяющей сборки (ТВС) Н-214 реактора БН-350.

Образцы для исследований

Экранная сборка Н-214 отработала в реакторе максимальное время и представляет собой шестигранную трубу, изготовленную из аустенитной нержавеющей стали 08X16H11M3, элементный состав которой приведен в таб. 1. Из шестигранного чехла ТВС с разных отметок от центра активной зоны (отметка "0"), были вырезаны пластины с размерами 50×10×2 мм. В таб.2 указаны отметки, с которых вырезаны пластины, а также

рассчитанные значения температуры облучения и повреждающей дозы.

Таблица 1

Элементный состав стали сборки Н-214
(данные рентгенофлуоресцентного анализа)

Элемент	Содержание, вес. %
Cr	17.5 ± 0.3
Mn	1.5 ± 0.9
Fe	67.9 ± 0.8
Ni	11.1 ± 0.3
Zn	0.38 ± 0.08
Mo	1.65 ± 0.02
Nb	0.052 ± 0.007

Таблица 2

Параметры облучения

Отметка, мм	T, °C	Доза, сна
1200	280	0.25
-900	281	1.27
-500	309	7.10
0	340	15.60
+500	365	6.03

В горячих камерах ИЯФ НЯЦ РК из пластин с помощью электроискровой резки и последующей шлифовки и полировки приготавливались образцы для металлографических, рентгеноструктурных, электронно-микроскопических исследований и прецизионных механических испытаний. Схема разделки приведена на рис.1.

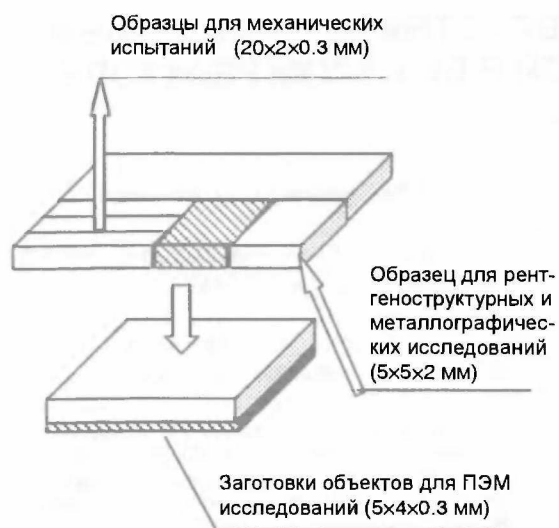


Рис.1. Схема разделки пластины для подготовки образцов к исследованиям

Металлографические исследования

При металлографическом исследовании стальных образцов, вырезанных из различных участков шестигранного чехла сборки Н-214, обнаружено, что микроструктура стали 08Х16Н11М3 в значительной степени неоднородна.



Рис. 2. Микроструктура облученной нейтронами стали 08Х16Н11М3, лицевая поверхность чехла, отметка "-500"

Наряду с крупными (~ 80 мкм) зернами наблюдается множество мелких (~ 8 мкм), которые группируются в областях между большими кристаллитами. Внутри зерен и на их границах наблюдаются цепочки сферических выделений карбидных частиц, скорее всего Cr_{23}C_6 . Их количество и размер особенно существенен на отметке "-500", см рис.2.

Необходимо отметить, что для этой же области рентгеноструктурные исследования, выполненные на дифрактометре ДРОН-3м, показали уменьшение параметра решетки от 0.35924 нм для отметки "-900", до 0.35881 для отметки "-500", рефлекс (220). При этом наблюдается значительное уширение рентгеновской линии (220) от 0.45 до 0.64 град. Эти факты с одной стороны свидетельствуют о фазовом распаде, а с другой - об образовании большого числа областей с сильным искажением кристаллической решетки.

Просвечивающая электронная микроскопия

ПЭМ-объект, который представляет собой диск диаметром 3 мм и толщиной 0.3 мм с коническим отверстием посередине, исследовали с помощью микроскопа JEM - 100СХ при ускоряющем напряжении ~ 100 кВ. Микроструктура образца, облученной нейтронами стали с отметки "-500", представлена рис.3.

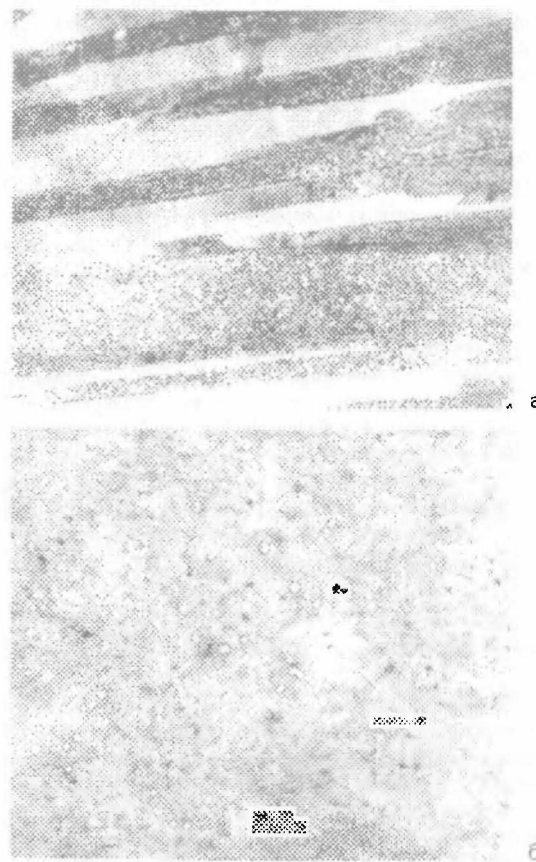


Рис. 3. Микроструктура облученной стали 08Х16Н11М3 с отметки "-500", лицевая поверхность, а - полосчатый контраст, б - микропоры

В отдельных зернах наблюдается характерный полосчатый контраст высокой плотности. Внутри каждой из полос видны радиационные дефекты в виде мелких дислокационных петель и множественных кластеров дефектов. Особенно следует отметить тот факт, что в структуре стали наблюдаются поры, размер которых изменяется в интервале 8-15 нм, а плотность распределения которых составляет $6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Средний размер пор равен $\sim 10 \text{ нм}$, что соответствует величине распухания 0.04%. Отметим значительный разброс величины распухания от зерна к зерну и от грани к ребру чехла.

Механические испытания

Проведены прецизионные механические испытания тонких пластинок размером $20 \times 2 \times 0.3 \text{ мм}$. Эксперименты по статическому растяжению с постоянной скоростью 0.5 мм/мин. при температуре 20°C выполнены на универсальной испытательной машине Инстрон 1195, дополнительно оборудованной пневматическими захватами, давление в которых составило $\sim 5.0 \text{ атм.}$

Вычисленные из машинных диаграмм растяжения значения пределов текучести $\sigma_{0.2}$ и относительной равномерной деформации δ_p в зависимости от повреждающей дозы представлены на рис. 4. Видно, что уже при дозе $\sim 7 \text{ сна}$ наблюдается значительное снижение скорости упрочнения и существенное охрупчивание стали.

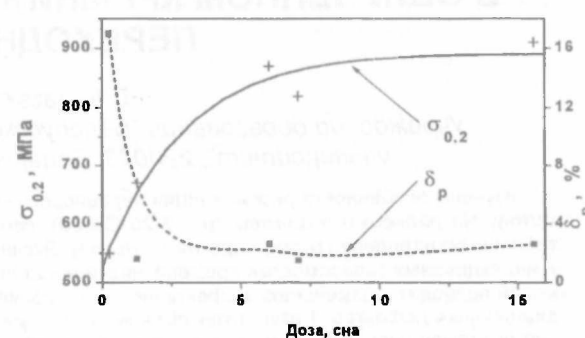


Рис.4. Влияние повреждающей дозы на характеристики прочности и пластичности

Заключение

Результаты комплексных исследований структуры и механических свойств нержавеющей стали 08X16H11M3, облученной в реакторе БН-350 можно сформулировать следующим образом:

- во всех исследованных образцах стали наблюдается неоднородность структуры, большая чем это следовало бы ожидать в рамках требований технических предъявляемых к чехловым трубам ТВС;
- в образцах, для отметок "-500", "0" и "+500" наблюдалась поры;
- изменение механических свойств исследуемого материала от дозы облучения носит обычный для облученных металлических материалов стадийный характер.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL 08Cr16Ni11Mo3 IRRADIATED IN FAST NEUTRON REACTOR BN-350

K.K. Kadyrzhanov¹⁾, O.G. Romanenko²⁾, T.E. Turkebaev¹⁾, O.P. Maksimkin¹⁾, S.B. Kisilitsin¹⁾, E.V. Chumakov¹⁾

¹⁾Institute of Nuclear Physics of National Nuclear Center of Republic of Kazakhstan, 480082, Kazakhstan, Almaty, Ibragimov St., 1, 7(3272)546467, 7(3272)546517, e-mail: skislitsin@inp.kz

²⁾Nuclear technology safety center, 480020 Kazakhstan, Almaty, Liza Chaikina St, 4, 7(3272)646801, 7(3272)646801, e-mail: romanenko@ntsf.kz

The results of complex researches of structure and mechanical properties of stainless steel 08Cr16Ni11Mo3 - the material of fuel assembly shroud N - 214 spent in BN-350 fast neutron reactor are presented. The plates by the size of $50 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ were cut off from the shroud of N-214 assembly on different spacing intervals from center of an active zone (marks "-1200", "-900", "-500", "0", "+500" mm, the mark "0" means center of an active zone). Samples for studies were made from plates with the help of cutting, grinding and polishing in hot cells of INP NNC RK. Researches of structure by methods of optical metallography, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-Ray diffractometry and mechanical property investigation by the method of a static stretching are carried out. Structural researches have shown that in all studied samples of steel inhomogeneous structure is observed i.e. alongside with large ($\sim 80 \text{ microns}$) grains are present a set of small ($\sim 8 \text{ microns}$) grains, which one are clustered in the areas between large crystallites. Probably, it is connected with initial (up to an irradiation) structure of the steel of fuel assembly shroud N - 214. Voids is observed by means of TEM in investigated samples from marks "-500", "0" and "+500". The void concentration and sizes distribution of voids were determined. Calculated value of void swelling does not exceed 0.2 %. Void formation take place at damage dose $\sim 7 \text{ dpa}$ and higher at irradiation temperature $\sim 309^\circ\text{C}$. As follows from the received data, increasing of irradiation temperature lead to decreasing of damage dose for void formation. Dependencies of change of mechanical properties from damage dose have usual for irradiated metallic materials stages in radiation hardening.