УДК: 621.039.531:669

# ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОТРАБОТАВШИХ ТВС РЕАКТОРА БН-350 В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ

## Кожахметов Е.А., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Мухамеджанова Р.М., Бельдеубаев А.Ж.

# Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

#### kozhahmetov\_e@nnc.kz

В работе представлены результаты испытаний облученных образцов материала различных ОТВС РУ БН-350 в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки. Определены зависимости прочностных характеристик образцов материала ОТВС из стали марки 12X18H10T от температуры и постоянной нагрузки путем кратковременных испытаний на одноосное растяжение. Исследован характер излома образцов материала ОТВС до и после испытаний.

**Ключевые слова:** реактор БН-350, тепловыделяющая сборка, оболочка, карбиды, карбонитриды, вязкое разрушение, квазистатическое разрушение.

### Введение

В настоящее время определение физико-механических характеристик и прогнозирование поведения конструкционных материалов при долговременном хранении являются важными задачами развития атомной отрасли, поскольку длительное хранение является неотъемлемой частью обращения с отработавшим топливом.

Долговременное хранение (4–50 лет) в металлических и металлобетонных контейнерах, «сухих» модульных камерах-хранилищах, «мокрых» хранилищах, является одним из широко используемых методов хранения ОЯТ. Обоснование гарантируемого ресурса критических компонентов и конструкций ядерных реакторов, особенно при долговременном хранении, требует надёжной информации об изменении исходной структуры конструкционных материалов, их механических свойств, химическом составе после воздействия реакторного излучения, температуры и среды [1].

Учитывая, что контроль температуры, давления или состояния топливных сборок при хранении не предусмотрены, единственным инструментом для оценки состояния топливных сборок остается проведение модельных исследований с облученными материалами, и экстраполяция экспериментальных данных на последующие условия хранения TBC [2]. Данные результаты будут востребованы как для корректного прогнозирования поведения топливных сборок при длительном сухом хранении, так и для разрабатываемых проектов, связанных с надёжностью конструкционных материалов, работающих в условиях реакторного излучения.

# Объект исследования и методика испытаний

Образцы для испытаний были вырезаны из пластины стали 12X18H10T размерами 50×20×2 мм, в свою очередь вырезанной из штатных ОТВС на участке «0 мм» от ЦАЗ. За время эксплуатации образцы получили повреждающие дозы в интервале от 12 сна до 59 сна. Подробные характеристики выбранных образцов стали приведены в таблице 1.

Для проведения испытаний в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки на материалы различных ОТВС РУ БН-350 были изготовлены специальные «образцы – лопатки».

Методика изготовления данных образцов включала два основных этапа:

**1-й этап** – разделка фрагментов, вырезанных из грани чехла различных типов ОТВС БН-350, на прямоугольные заготовки для образцов (рисунок 1-а);

**2-й этап** – изготовление образцов из полученных прямоугольных заготовок (рисунок 1-б).

| Наименование изделия, материал                           | Чехол Н-214     | Чехол ЦЦ-15Т | Чехол ЦЦ-19 |  |
|--|-----------------|--------------|-------------|--|
| Наработка, эфф. сутки                                    | 3696,7          | 291,8        | 370,9       |  |
| Координаты относительно ЦАЗ, размеры, мм                 | «0 мм», 50×20×2 |              |             |  |
| φ <sub>t</sub> , 10 <sup>23</sup> см⁻² (макс. доза, сна) | 0,7 (~12)       | 1,731 (~48)  | 1,944 (~59) |  |
| Мощность реактора, МВт                                   | 750             | 650          | 680         |  |
| Т <sub>вх</sub> – Т <sub>вых</sub> , °С                  | 290– 450        |              |             |  |
| Макс. скорость набора дозы, 10⁻⁵ сна/с                   | 0,038           | 1,91         | 1,84        |  |

Таблица 1. Характеристики отобранных образцов ОТВС РУ БН-350

Разделка фрагментов грани чехла различных типов ОТВС БН-350 на прямоугольные заготовки осуществлялась с помощью проволочно-вырезного электроэрозионного станка типа 4531. Изготовление образцов из заготовок осуществлялось методом электроэрозионной прошивки, с помощью специально изготовленной оснастки, на станке типа 4531.

После каждого этапа работ вырезанные заготовки подвергались механической шлифовке и полировке на станке *Forcipol 1V* с применением водяного охлаждения. Из каждого чехла ОТВС изготавливалось по четыре образца, преимущественно из центральной части, то есть наибольший съем материала при шлифовке осуществлялся из периферийной части. Типичное изображение образца из материала сборки H-214 после этапов разделки и прошивки электроэрозионным методом представлено на рисунке 1.



а) заготовка после разделки и финишной обработки



 б) готовый образец после электроэрозионной прошивки



 в) схема «образцов - лопаток» для испытаний с основными геометрическими параметрами

### Рисунок 1. Изображение образца на различных этапах его изготовления

Кратковременные механические испытания образцов на одноосное растяжение при комнатной температуре проводились при помощи универсальной испытательной машины *INSTRON 5966*. Испытания в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки при одноосном растяжении проводились на испытательной машине «КОРИНА», разработанной на базе Филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, которая позволяет проводить испытания, максимально приближенные к условиям длительного сухого хранения ОЯТ. Данная установка позволяет поддерживать в ходе эксперимента постоянную скорость деформации или постоянную нагрузку на образец. Условия проведения испытаний: среда – «воздух», температура 400 °С (изотермический процесс), длительность 300 ч.

Перед началом испытаний образец устанавливался в захваты. Зафиксированные захваты помещались в высокотемпературную камеру. После достижения температуры испытаний (время достижения не более 10 мин.) образец нагружали до установленного значения и выдерживали при постоянной растягивающей нагрузке в течение заданного времени или до полного разрушения образца.

Исследования характера излома образцов материала чехла ОТВС после испытаний выполнялись на сканирующем электронном микроскопе *TESCAN VEGA3* в режиме вторичных и отраженных электронов с применением системы энергодисперсионного микроанализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Перед проведением изотермических испытаний образцов материала чехла ОТВС, подвергавшихся различным дозам облучения, необходимо было определить нагрузку на образец для каждого типа материала чехла ОТВС. Значение нагрузки на образец определялось из условия 0,9  $\sigma_{0,2}$  (условный предел текучести). Для определения условного предела текучести были проведены механические испытания образцов на одноосное растяжение при комнатной температуре на универсальной испытательной машине INSTRON 5966 co скоростью перемещения 2,5 мм/мин. Исходные данные для определения σ<sub>0.2</sub>, полученные экспериментальным путем, приведены в таблице 2.

| Наименование<br>образца | Деформация<br>при<br>растяжении, % | Условный<br>предел<br>текучести<br>σ <sub>0,2</sub> , Н/мм <sup>2</sup> | Максимальное<br>напряжение<br>σ <sub>в</sub> , МПа |  |
|-------------------------|------------------------------------|---|--|--|
| Чехол ЦЦ-19             | 24,8                               | 850,97  | 1311,3   |  |
| Чехол ЦЦ-15Т            | 20,1                               | 780,8   | 1102,5   |  |
| Чехол Н-214             | 14,9                               | 929,8   | 1059,7   |  |

| $1 u 0 \pi u u u 2. \Pi c \pi 0 0 \pi 0 e 0 u \pi 0 e 0 \pi 0 u c e \pi u \pi u c p v s r$ | Таблииа | 2. | Исходные | данные | для | расчета | нагрузк |
|--|---------|----|----------|--------|-----|---------|---------|
|--|---------|----|----------|--------|-----|---------|---------|

Из таблицы 2 видно, что облучение материалов чехла ОТВС из стали марки 12Х18Н10Т привело к повышению их прочностных характеристик. Это согласуется с представлениями о том, что характеристики прочности и пластичности материалов активной зоны чувствительны по отношению к параметрам облучения (температура, повреждающая доза). Образцы из центральных сборок с большой дозой облучения обладают значительно более высокой пластичностью и пределом прочности ( $\sigma_B$ ) по сравнению с образцом экранной сборки. В то же время значение предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) образца экранной сборки H-214 наибольшее по сравнению с образцами центральной сборки.

В ходе проведения испытаний в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки образец экранной ОТВС H-214 разрушился по достижению 280 ч. Когда уровень приложенного напряжения близок к пределу текучести материала чехла ОТВС, увеличение деформации происходит быстрее и приводит к разрушению образца.



Рисунок 2. Рельеф излома облученного образца из материала чехла ОТВС H-214

Поверхность образца материала чехла ОТВС H-214 до и после длительных испытаний представляет из себя квазистатический характер разрушения с присущими ему характеристиками излома. Изображения поверхности излома аустенитной стали до и после длительных испытаний, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены на рисунках 2 и 3. Из приведенных на рисунке 2 фрактограмм видно, что в исходном состоянии излом имеет вязкий внутризеренный ячеистый характер. Участки межзеренного разрушения отсутствуют.

Характер излома образца сборки H-214 после испытаний имеет смешанный вид хрупко-вязкого разрушения (рисунок 3), и, можно предположить, что разрушение произошло в результате развития процесса коррозионного растрескивания. Неоднородность поверхности излома свидетельствует о нестабильном развитии хрупко-вязкого разрушения. Ямочный характер разрушения области (а) и (б) свидетельствует о вязком разрушении на этом участке. На изломе образца в области вязкого разрушения после испытаний изменяются размер и форма ямок, то есть наблюдается переход формы ямок из круглой в эллипсоидную.

Область (в) характеризуется тем, что при испытании механизм распространения трещины по ней был в виде внутризеренного скола, для которого характерно образование межзеренных фасеток в виде многоугольников, образующихся при разрушении по одной грани зерна. Доля области хрупкого разрушения в изломе образца составляет примерно 25 %.

Образцы центральных ОТВС ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 после испытания длительностью 300 ч при температуре 400 °С не разрушились. На испытанных образцах сборки ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 остаточная пластическая деформация не наблюдалась, что вполне ожидаемо, так как регистрируемое удлинение происходит в упругой зоне. Кривая зависимости деформации є от времени t при постоянной нагрузке и температуре для образцов ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 представлена на рисунке 4.

Длительные испытания при постоянной нагрузке температуре показали, что на диаграмме И зависимости деформации от времени наблюдаются две основные стадии: участок затухающей ползучести и участок установившейся ползучести. Для начальной стадии характерна высокая скорость ползучести, продолжительность этой стадии для обоих образцов около ~ 50 часов. Вторая стадия стадия установившейся ползучести, для которой характерна постоянная скорость деформации. Наибольший интерес представляет собой стадия установившейся ползучести, т.к. именно она определяет долговременную прочность материала. Значения максимально достижимой деформации и скорости деформации позволят оценить период времени до разрушения материала [3].



Рисунок 3. Рельеф излома облученного образца из материала чехла OTBC H-214 после длительных испытаний на растяжение при комнатной температуре



Рисунок 4. Зависимость деформации от времени испытаний для облученных образцов материала чехла ОТВС (ЦЦ-15Т, ЦЦ-19) центрального типа

После длительных механо-термических испытаний с целью определения изменений в физико-механических свойствах были проведены испытания на растяжение при комнатной температуре до разрушения образцов. Основные данные по прочностным характеристикам образцов после механо-термических испытаний представлены в таблице 3.

| Габлица 3. | Прочностные   | характер | ристики | образцов |
|------------|---------------|----------|---------|----------|
| посл       | е механо-терм | ических  | испытан | ий       |

| Наименование<br>образца | Деформация<br>при<br>растяжении, % | Условный<br>предел<br>текучести,<br>Н/мм² | Максимальное<br>напряжение,<br>МПа |
|-------------------------|------------------------------------|---|------------------------------------|
| Чехол ЦЦ-19             | 29,4                               | 790,4                                     | 1033,9                             |
| Чехол ЦЦ-15Т            | 25,9                               | 653,2                                     | 962,7                              |

По результатам испытаний обоих образцов наблюдается уменьшение эффекта радиационного упрочнения, предположительно это обусловлено частичным отжигом радиационных дефектов. Также необходимо отметить увеличение пластичности исследуемых образцов примерно на 5 %, что ожидаемо, так как длительные механо-термические испытания привели к увеличению разницы между пределом прочности и пределом текучести ( $\sigma_B - \sigma_{0.2}$ ).

На рисунке 5 представлены фрактограммы поверхности разрушения образцов ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 материала чехла ОТВС БН-350 (увеличение: ×140, ×4000) после испытаний на растяжение при комнатной температуре. На поверхности наблюдаются поперечные борозды, образование которых возможно связано с наличием включений в материале. При больших увеличениях видно, что для поверхности излома характерно вязкое разрушение и наличие ямочного микрорельефа. Очаг разрушения в обоих случаях расположен в центральной зоне. Поверхность разрушения матовая, неровная. В центральной части шейки образца вязкое разрушение характеризуется наличием разносных ямок нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями, которые образовались в результате слияния микропор (рисунок 5).

При исследовании поверхности излома всех образцов методом СЭМ было обнаружено присутствие большого количества включений (рисунок 6). Проведенный рентгеновский спектральный микроанализ показал, что включения представляют собой, в основном, карбидные и карбонитридные фазы. Данного типа фазы наблюдаются в образцах как в исходном состоянии, так и после длительных механо-термических испытаний. При совместном воздействии длительной температурной выдержки и постоянной нагрузки, количество и размер крупных карбонитридных фаз не изменяются, в то время как количество и размер мелких карбидов на основе хрома в исследованных образцах несколько увеличивается.



б)

Рисунок 5. Макро- и микрорельеф излома образца материала чехла ОТВС ЦЦ-15Т (а) и ЦЦ-19 (б) после испытаний на растяжение



Рисунок 6. Фотография излома, где наблюдается неметаллическое включение образцов из материала чехла ОТВС

# Выводы

1. Образцы из центральных сборок (ЦЦ-15Т, ЦЦ-19) с большой дозой облучения обладают значительно более высокой пластичностью и пределом прочности ( $\sigma_B$ ) по сравнению с образцами экранной сборки (H-214). В то же время величина предела текучести ( $\sigma_{0.2}$ ) образцов экранной сборки наибольшая по сравнению с образцами центральной сборки. Также экспериментально установлено, что близкое значение уровня приложенного напряжения к пределу текучести образца материала чехла ОТВС приводит к быстрому увеличению деформации и разрушению образца во время длительных испытаний.

2. Фрактографические исследования поверхностей разрушения образцов материала ОТВС после испытаний и в исходном состоянии показали, что на всей поверхности излома образцов наблюдается вязкое разрушение и наличие ямочного микрорельефа. Очаг разрушения во всех случаях расположен в центральной зоне. Структура поверхности разрушения неровная. В центральной части шейки образцов вязкое разрушение характеризуется наличием образовавшихся путем слияния микропор разносных ямок нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями.

3. На поверхности излома всех образцов до и после испытаний было обнаружено присутствие большого количества карбидных и карбонитридных фаз. Установлено, что при совместном длительном воздействии длительной температуры и постоянной нагрузки количество и размеры крупных карбонитридных фаз не изменяются, в то время как количество и размеры мелких карбидов на основе хрома в исследованных образцах увеличивается.

# Литература

- Коянбаев Е.Т., Максимкин О.П., Азимханов А.С., Изучение поведения отработавших топливных сборок ядерных реакторов при их длительном сухом хранении // В кн. «Экспериментальные исследования в области безопасности атомной энергии, ч. 1» – Курчатов, НЯЦ РК. – 2010. – с. 331–348.
- Коянбаев Е.Т., Ситников А.А., Скаков М.К., Бакланов В.В., Яковлев В.И., Прогнозирование изменений структуры и свойств конструкционных материалов реактора БН-350 во время длительного сухого хранения ОЯТ // Ползуновский Вестник No 4 T.2 2016, с. 207–211.
- Голованов В.Н., Неустроев В.С., Повстянко А.В., Шамардин В.К., Изменение механических свойств стали ОХ16Н15МЗБ в температурном интервале радиационного распухания. // Препринт НИИАР 30 (711) 1986 г.
- Кислицин С.Б., Диков А.С., Сатпаев Д.А., Ларионов А.С., Пострадиационные испытания конструкционных сталей материалов чехлов отработавших ТВС реактора БН – 350 // 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2015 г., Минск, Беларусь.
- Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Мальцев Д.А., Федотова С.В., Фролов А.С., Забусов О.О., Салтыков М.А., Структурные исследования стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочей температуре корпуса реактора // Известие вузов, Ядерная энергетика № 4 июнь – 2012.
- 6. Koji FUKUYA, Morihito NAKANO, Katsuhiko FUJII, Tadahiko TORIMARU, IASCC Susceptibility and Slow Tensile Properties of Highly-irradiated 316 Stainless Steels. // Journal of Nuclear Science and Technology, 41:6, 673-681.
- Воробьев В. Л., Быков П. В., Баянкин В. Я., Влияние скорости набора дозы ионов марганца на изменение механических свойств, морфологии и состава поверхностных слоев углеродистой стали // ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ, 2012, том 113, № 11, с. 1153–1159.

## ¥ЗАҚ ТЕРМИЯЛЫҚ ҚАРТАЮ ЖАҒДАЙЫНДА БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ТВС МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІН ЗЕРТТЕУ

Е.А. Кожахметов, Е.Т. Коянбаев, Е.Е. Сапатаев, Р.М. Мухамеджанова, А.Ж. Бельдеубаев

Қазақстан, Курчатов қ., ҚР ҰЯО Атом Энергия Институты

kozhahmetov\_e@nnc.kz

Жұмыста температура мен механикалық жүктеменің ұзақ және тұрақты әсер етуі жағдайындағы әртүрлі БН-350 РҚ ПЖБЖ материалының сәулеленген үлгілерін сынау нәтижелері ұсынылған. Бір осьтік созылуға қысқа мерзімді сынақтар жүргізу жолымен температура мен тұрақты жүктемеден 12Х18Н10Т маркалы болаттан жасалған ПЖБЖ материалының үлгілерінің тұрақты беріктілік сипаттамаларының тәуелділігін анықтақталды. ПЖБЖ материалының үлгілерінің сипаттамасы сынаққа дейін және сынақтан кейін зерттелді.

**Түйінді сөздер:** БН-350 реакторы, жылу бөлгіш жинақ, карбидтер, карбонитридтер, тұтқыр бұзылу, квазистатикалық бұзылу.

# STUDYING OF CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS OF COMPLETED FA OF THE BN-350 REACTOR UNDER CONDITIONS OF LONGER THERMAL AGING

Ye.A. Kozhakhmetov, Ye.T. Koyanbaev, Ye.Ye. Sapataev, R.M. Mukhamedzhanova, A.Zh. Beldeubaev

### Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

kozhahmetov\_e@nnc.kz

The paper presents results of tests of irradiated samples of material from various SFAs of BN-350 RP under conditions of prolonged and constant exposure to temperature and mechanical load. The dependencies of strength characteristics of SFA material samples made of 12X18H10T steel on temperature and constant load were determined through short-term uniaxial tensile tests. The nature of the fracture of the SFA material samples was investigated before and after the tests.

Keywords: BN-350 reactor, fuel assembly, shell, carbides, carbonitrides, viscous fracture, quasistatic fracture.