

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР “КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ”

На правах рукописи

Скундин Матвей Александрович

**ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫДЕРЖЕК ПРИ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Специальность 05.14.03. – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт”

Научный руководитель: доктор технических наук
Чернобаева Анна Андреевна

Официальные оппоненты: Марков Сергей Иванович,
Главный научный сотрудник,
доктор технических наук;
ГНЦ РФ ОАО НПО ЦНИИТМАШ

Никулин Сергей Анатольевич,
Заведующий кафедрой, доктор
технических наук, профессор;
НИТУ МИСиС

Ведущая организация: ОКБ «Гидропресс»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2012 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” по адресу: 123182, г. Москва, пл. Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ “Курчатовский институт”

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

В.Г. Мадеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность:

Корпус реактора является основным физическим барьером, внутри которого находятся все продукты деления в процессе эксплуатации атомных станций с реакторами типа ВВЭР. Обеспечение целостности корпуса реактора в любой момент эксплуатации в штатных и аварийных режимах является приоритетом номер один. Корпус реактора предназначен для эксплуатации в течение десятков лет. Корпуса реакторов ВВЭР-1000 изготавливаются из малоуглеродистых низколегированных сталей марок 15Х2НМФА и 15Х2НМФА-А и сварных соединений соответствующих марок. Материалы корпуса реакторов типа ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации подвергаются длительному воздействию повышенных температур (290-320°С) и потока быстрых нейтронов из активной зоны, что приводит к деградации их свойств.

Максимальная температура эксплуатации корпуса достигается в области верхней обечайки зоны патрубков и составляет ~310-320°С. При наступлении проектной аварии залив холодной воды происходит одновременно через верхнюю и нижнюю обечайки зоны патрубков. Металл обечаек зоны патрубков является критичным с точки зрения влияния температурного старения на безопасность эксплуатации корпусов ВВЭР-1000, так как в ситуации залива корпуса холодной водой максимальный для стенки корпуса перепад температур возникает в верхней обечайке зоны патрубков (плюс 20÷плюс 320°С).

Для необлучаемых элементов корпуса ВВЭР-1000, например, зоны патрубков, определяющим фактором в изменении свойств является длительное воздействие рабочих температур 310-320°С (температурное старение). Оценка эффектов температурного старения – важная часть работ по исследованию закономерностей изменения свойств материалов корпусов реакторов в процессе эксплуатации.

В 70-х годах после выбора стали для изготовления корпусов ВВЭР-1000 в НПО ЦНИИТМАШ была выполнена работа по аттестации сталей 15Х2НМФА и 15Х2НМФА-А. Аттестацию склонности к температурному старению проводили при 350°С с выдержками от 1000 до 10000 часов. Для описания изменения критической температуры хрупкости под действием температурного старения (ΔT_T) была предложена кривая с максимумом. Консервативная оценка ΔT_T для металла обечаек в процессе эксплуатации в аттестационном отчете 1998 года определена соотношениями:

$$\begin{cases} \Delta T_T = 30^\circ \text{C} \text{ при } t \leq 50000 \text{ час.} \\ \Delta T_T = 5^\circ \text{C} \text{ при } t > 50000 \text{ час.} \end{cases} \quad (1)$$

Для контроля и прогнозирования изменения свойств материалов корпуса в процессе эксплуатации используют программу образцов-свидетелей. Образцы-свидетели выполнены из тех же материалов, что и сам корпус реактора. Основная цель программы образцов-свидетелей – это подтверждение консервативности заложенных в обоснование безопасной эксплуатации корпусов реакторов зависимостей. Если консервативность зависимостей не

подтверждается результатами испытаний образцов-свидетелей (например, как в случае с облучаемыми сварными швами с высоким содержанием никеля), тогда на основании результатов испытаний образцов-свидетелей разрабатывается новая зависимость.

В девяностые годы в РИЦ «Курчатовский институт» начали получать данные испытания температурных образцов-свидетелей ВВЭР-1000, которые зафиксированы в отчетах по образцам-свидетелям. В настоящий момент накоплена база данных, состоящая из 32 точек по значениям критической температуры хрупкости и пределу текучести. На рисунке 1 представлено сопоставление результатов испытаний образцов-свидетелей (точки) с нормативными значениями для температурного старения (заштрихованные области).

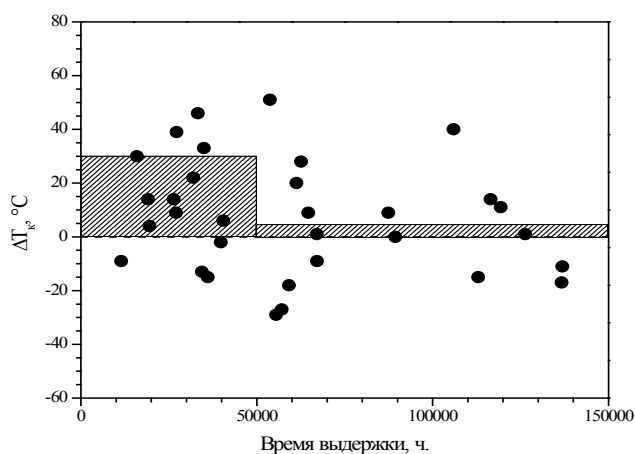


Рисунок 1 – База данных температурных образцов-свидетелей ОМ и нормативная зависимость для металла обечаек ВВЭР-1000

Сопоставление результатов испытаний штатных образцов-свидетелей с нормативными значениями указывает на неконсервативность нормативных значений по оценке эффектов температурного старения.

В работе Б.З.Марголина, В.А.Николаева, Е.В.Юрченко, Ю.А.Николаева, Д.Ю.Ерака, А.В.Николаевой на основании базы данных температурных образцов-свидетелей ВВЭР-1000 была предложена новая зависимость для прогноза изменения свойств материалов корпусов ВВЭР-1000 в результате температурного старения. Предположения по механизму изменения свойств аналогичны тем, которые были изложены в работах В.Н.Юханова, С.И.Маркова и А.Д.Шура. Для описания данных предложена кривая с максимумом. Повышение критической температуры хрупкости металла в процессе старения связывается с упрочнением материала. Упрочнение в различных временных диапазонах определяется сначала выделением, а затем коагуляцией карбидов. При выпадении карбидов ΔT_T возрастает, при коагуляции карбидов – снижается. Консервативная оценка изменения критической температурой хрупкости для основного металла (для 320 °C) определяется соотношением:

$$\Delta T_T(t) = (2,65 + 13,88 * \exp((24600-t)/19800)) * \text{th}(t/19800) + 38 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2)$$

Свободный член (38°C) характеризует рассеяние точек относительно средней линии регрессии. Экспериментальные значения ΔT_T (точки), средние расчетные

значения (сплошная линия) и консервативная оценка ΔT_T (пунктирная линия) представлены на рисунке 2.

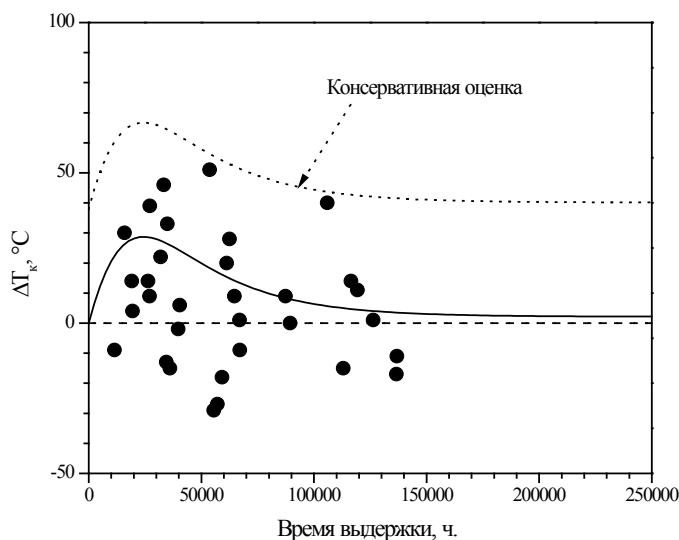


Рисунок 2 – Консервативная оценка ΔT_T для базы данных штатных температурных образцов-свидетелей основного металла ВВЭР-1000

Верхняя огибающая ΔT_T изменится от 40°C до 64°C . С самого начала возникло предположение о том, что такие высокие значения оценки ΔT_T связаны с существенным вкладом разброса свойств в результате испытаний контрольных и температурных образцов-свидетелей.

Это потребовало более детального анализа результатов испытаний штатных температурных образцов-свидетелей основного металла. Анализ базы данных температурных образцов-свидетелей основного металла ВВЭР-1000 был выполнен в отчетах по проекту АЭС-2006 и выявил особенности полученных данных: повышение критической температуры хрупкости основного металла после выдержек при температуре $310\text{--}320^\circ\text{C}$ отмечено не для всех случаев, а только для $\frac{3}{4}$ значений. Повышение предела текучести основного металла отмечено только для $\frac{2}{3}$ экспериментальных значений. Повышение критической температуры хрупкости основного металла не всегда сопровождается повышением предела текучести. В некоторых случаях повышение критической температуры хрупкости сопровождается снижением предела текучести и наоборот (рисунки 3 и 4).

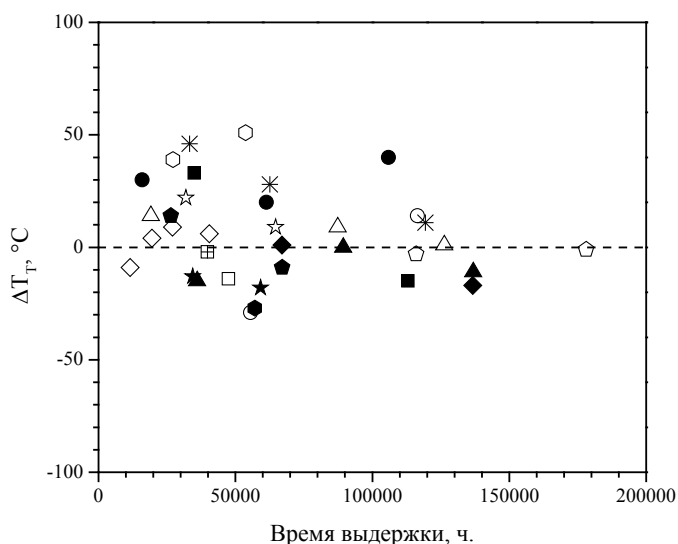


Рисунок 3 – Изменение критической температуры хрупкости, определенное по результатам испытаний образцов-свидетелей основного металла; каждое обозначение соответствует одному материалу

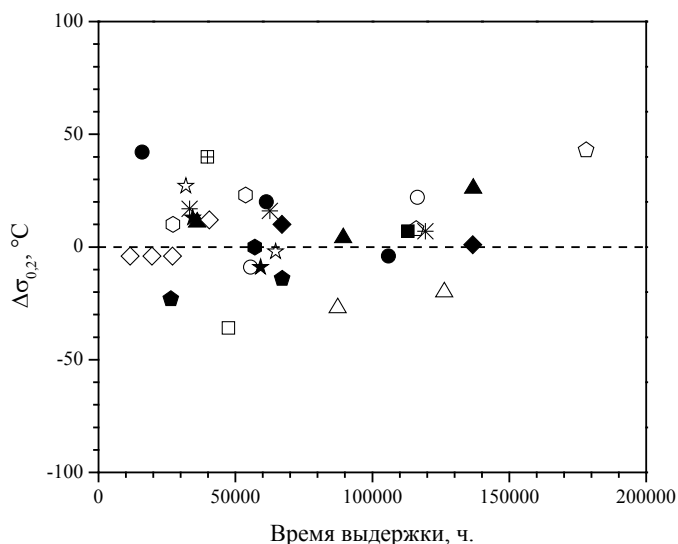


Рисунок 4 – Изменение предела текучести, определенное по результатам испытаний образцов-свидетелей основного металла; каждое обозначение соответствует одному материалу

В настоящей работе было высказано предположение о том, что разброс экспериментальных данных связан с разбросом свойств между группами образцов-свидетелей основного металла в исходном состоянии. Выполнение работы, позволяющей оценить эффекты температурного старения для основного металла на основании исследования образцов-свидетелей с исключением вклада разброса свойств, в максимально возможной степени, является весьма актуальной, поскольку позволяет получить оценки эффектов температурного старения на основании металла образцов-свидетелей.

Цель работы

Поскольку образцы-свидетели основного металла изготовлены из тех же материалов, что и обечайки корпусов ВВЭР-1000, и выдерживаются в реакторе в том же температурном режиме, что и обечайки зоны патрубков в процессе эксплуатации, они являются наилучшим объектом для корректной оценки изменения свойств материалов корпусов ВВЭР-1000. В то же время, данные испытаний штатных образцов-свидетелей основного металла характеризуются большими разбросами; в связи с этим целью настоящей работы было:

- 1) Исследование распределения свойств в местах вырезки образцов-свидетелей и в металле обечайки для установления причин разброса результатов испытаний образцов-свидетелей основного металла.
- 2) Разработка способа оценки изменения свойств основного металла под влиянием температурного старения (в интервале времен от 11000 до 180000 часов) на базе металла контрольных и температурных образцов-свидетелей с максимально возможным уменьшением вклада в результат разброса свойств в интервале температур, характерных для стационарной эксплуатации обечаек зоны патрубков.
- 3) Создание и анализ новой базы данных по исследованию температурного старения основного металла (в интервале времен от 11000 до 180000 часов) с максимально возможным уменьшенным вкладом разброса свойств в исходном состоянии.

Научная новизна работы

1. Экспериментально показано, что для мест вырезки образцов-свидетелей (пробное кольцо) характерен градиент критической температуры хрупкости в аксиальном направлении. Различие значений критической температуры хрупкости в торцевой части пробного кольца и в объемах, примыкающих к обечайке, может достигать 65°C .
2. Экспериментально показано, что определение $T_{к0}$ на образцах, вырезанных из пробного кольца обечайки во всех случаях является неконсервативным.
3. Показано, что причиной повышенного разброса результатов испытаний штатных образцов-свидетелей основного металла является то, что группы образцов-свидетелей эксплуатирующихся корпусов ВВЭР-1000 сформированы таким образом, что разность критической температуры хрупкости для контрольных и текущих комплектов в исходном состоянии может достигать $\sim 30^{\circ}\text{C}$.
4. Предложена схема изготовления образцов из металла контрольных и температурных образцов-свидетелей для исследования термического старения основного металла с максимально возможным уменьшением вклада разброса свойств в исходном состоянии.
5. Обоснована возможность снижения излишнего консерватизма в оценках эффектов температурного старения на основании данных образцов-свидетелей основного металла для времен от 8000 до 180 000 часов.
6. Проведена оценка эффектов температурного старения стали 15Х2НМФА-А на основании испытаний основного металла контрольных и температурных образцов-свидетелей основного металла корпусов ВВЭР-1000 с максимально возможным уменьшением вклада разброса свойств в исходном состоянии.

Практическая значимость работы

1. Результаты работы по исследованию распределения свойств в металле поковок использованы при разработке методики оценки исходного состояния металла обечаек эксплуатирующихся корпусов реакторов ВВЭР-1000 на основании испытаний образцов-свидетелей контрольных комплектов и архивного металла (проект РД ЭО 1.1.2.09.0789-2012, проект «Методики по оценке исходного состояния для новых проектов ВВЭР»).
2. Результаты исследования распределения свойств в различных объемах поковки использованы при разработке программ образцов-свидетелей АЭС-2006 для рекомендаций по изготовлению и компоновке комплектов образцов-свидетелей основного металла АЭС-2006 и ВВЭР ТОИ.
3. Результаты исследования температурного старения материалов основного металла ВВЭР-1000, полученные в настоящей работе, будут использованы при прогнозировании изменения свойств металла обечаек зоны патрубков под воздействием длительных выдержек при температуре эксплуатации для

корпусов АЭС-2006, ВВЭР ТОИ и продлении срока службы корпусов ВВЭР-1000.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Закономерности распределения значений критической температуры хрупкости в местах вырезки образцов-свидетелей основного металла.
2. Сравнительный анализ распределения критической температуры хрупкости в местах вырезки образцов-свидетелей и в обечайке.
3. Метод исследования температурного старения материалов основного металла ВВЭР-1000 на базе образцов-свидетелей с максимально возможным уменьшением вклада разброса свойств в исходном состоянии.
4. Оценка изменения свойств материалов основного металла ВВЭР-1000 в результате температурного старения с максимально возможным уменьшением вклада разброса свойств в исходном состоянии.

Апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на конференциях:

- Конференция молодых специалистов, ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 16-17 марта 2011 г.
- Конференция молодых специалистов, ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 21-22 марта 2012 г.
- Отраслевой научный семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники», ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск, 19-21 апреля 2011 г.
- VI-ая Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур», НИТУ МИСиС, г. Москва, 17-19 апреля 2012 г.
- Международная научно-техническая конференция «Конструкционная прочность и ресурс оборудования АЭС», ИПП НАН Украины, г. Киев, 2-5 октября 2012 г.
- Школа-конференция «Материалы перспективных реакторных установок: разработка и применение», НИЯУ МИФИ, г. Звенигород, 29 октября - 2 ноября 2012 г.

Личный вклад автора

Автор принимал активное участие в постановке и проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, статистической обработке и анализе данных.

Публикации

По результатам исследований при участии автора в научных изданиях опубликовано 8 работ, в том числе, 2 – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях. Список опубликованных работ приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа изложена на 170 страницах, включая 112 рисунков и 27 таблиц. Библиографический указатель состоит из 52 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы по исследованию температурного старения материалов основного металла корпусов ВВЭР-1000. Сформулированы цели диссертационной работы и решаемые задачи. Приведены основные положения, выносимые автором на защиту, представлена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

В **первой главе** представлены результаты обзора литературы, посвященной исследованию температурного старения малоуглеродистых низколегированных сталей, применяемых в атомной энергетике, в том числе и корпусной стали 15X2НМФА(-А). Проведен анализ опубликованных результатов по изменению механических свойств сталей в зависимости от температуры и времени выдержки, структурным изменениям в сталях под воздействием длительных температурных выдержек и изменению механических свойств и структуры корпусной стали 15X2НМФА-А при длительных температурных выдержках в интервале температур 290–400°C.

Во **второй главе** дано описание материалов, исследованных в работе, методик исследований и статистических методов обработки данных. Все исследования проведены на металле штатных поковок для корпусов ВВЭР-1000. В работе использовались образцы от 6 штатных поковок. Химический состав материалов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследованных материалов

Материал	Сталь	Содержание легирующих и примесных элементов, % масс.									
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V
ОЗП-1	15X2НМФА	0,15	0,25	0,44	0,010	0,018	0,15	2,00	0,50	1,17	0,11
ОЗП-2	15X2НМФА	0,16	0,32	0,42	0,010	0,010	0,11	2,05	0,53	1,34	0,08
ОМ(ЗТВ)-1	15X2НМФА-А	0,13	0,27	0,48	0,009	0,010	0,04	1,88	0,54	1,14	0,10
ОМ(ЗТВ)-2	15X2НМФА-А	0,17	0,24	0,43	0,006	0,012	0,05	2,02	0,54	1,28	0,10
ОМ(ЗТВ)-3	15X2НМФА-А	0,14	0,23	0,38	0,009	0,016	0,04	1,91	0,54	1,33	0,10
ОМ(ЗТВ)-4	15X2НМФА-А	0,16	0,30	0,43	0,006	0,011	0,04	2,05	0,51	1,09	0,10
ОМ(ЗТВ)-5	15X2НМФА-А	0,16	0,28	0,40	0,004	0,009	0,02	2,10	0,53	1,17	0,10
ОМ(ЗТВ)-6	15X2НМФА-А	0,14	0,22	0,42	0,007	0,013	0,05	1,91	0,49	1,11	0,10
ОМ(ЗТВ)-7	15X2НМФА-А	0,15	0,30	0,51	0,010	0,012	0,04	1,93	0,56	1,13	0,10
ОМ(ЗТВ)-8	15X2НМФА-А	0,15	0,28	0,43	0,006	0,004	0,05	1,82	0,50	1,15	0,10
ОМ(ЗТВ)-9	15X2НМФА-А	0,14	0,31	0,45	0,002	0,004	0,02	2,01	0,54	1,26	0,10

Все используемые материалы проходили стандартный цикл окончательной термической обработки. Для исследования распределения свойств в местах вырезки образцов свидетелей использовалось пробное кольцо от поковки №445152 (ОЗП-1), предназначенной для изготовления обечайки зоны патрубков (рисунок 5а). Распределение свойств в объеме обечайки исследовали с использованием темплетов из обечайки зоны патрубков (поковка №449278) (ОЗП-2), (рисунок 5б).

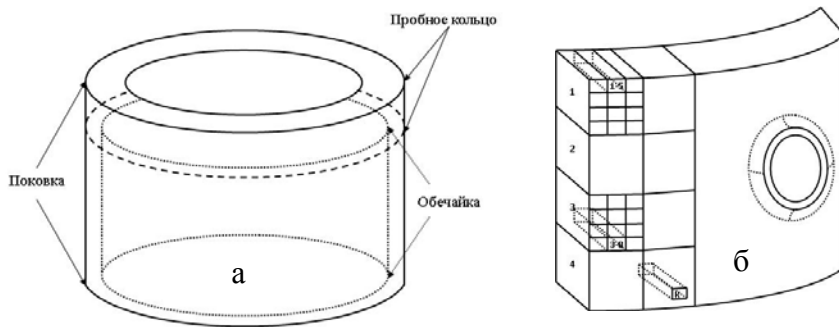


Рисунок 5 – Схема вырезки пробного кольца и обечайки из цилиндрической части поковки (а) и выбранного для исследований сегмента обечайки (б)

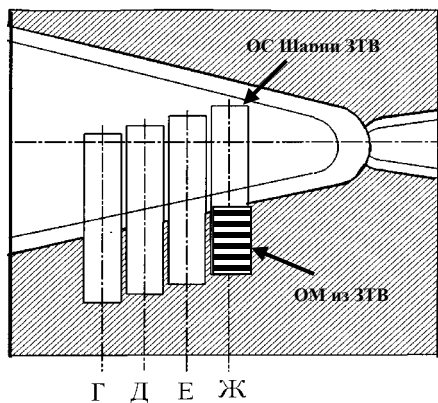


Рисунок 6 – Схема вырезки образцов-свидетелей ЗТВ с обозначением материала основного металла, выбранного для исследования.

Для исследования влияния температурного старения на изменение свойств основного металла корпусов ВВЭР-1000 использовался основной металл из контрольных и температурных комплектов образцов-свидетелей зоны термического влияния (рисунок 6) шести эксплуатирующихся корпусов ВВЭР-1000.

Изменение свойств основного металла оценивалось по изменению критической температуры хрупкости и прочностных характеристик. Количественный анализ данных выполнен с использованием методов математической статистики.

В третьей главе представлены результаты исследования распределения свойств в местах вырезки образцов-свидетелей и в металле обечайки корпуса ВВЭР-1000.

Образцы-свидетели эксплуатирующихся корпусов ВВЭР-1000 вырезаны из пробного кольца поковок для изготовления обечаек активной зоны. Для обеспечения однородности свойств по толщине образцы-свидетели вырезаны из средней по толщине части поковки ($\frac{1}{4}$ – $\frac{3}{4}$ толщины). Для обеспечения однородности свойств по высоте перед закалкой поковки на ее торец накладывают тепловой барьер, который должен обеспечить одинаковую скорость охлаждения по всей высоте обечайки в верхней ее части.

Для изучения причин разброса данных между группами образцов-свидетелей в исходном состоянии было проведено исследование распределения свойств в пробном кольце поковки, предназначенной для изготовления обечайки зоны патрубков, а также в металле обечайки зоны патрубков.

Исследование распределения свойств в местах вырезки образцов-свидетелей

Для исследования распределения свойств в местах вырезки образцов-свидетелей использовалось пробное кольцо от поковки №445152, предназначенной для изготовления обечайки зоны патрубков (ОЗП-1). Схема расположения пробного кольца в поковке представлена на рисунке 5. Целью исследования являлась оценка изменения содержания легирующих элементов и примесей, прочностных характеристик и критической температуры хрупкости в трех направлениях: радиальном (R_r), аксиальном (R_a) и азимутальном (R_t). Для этого из пробного кольца было вырезано 6 темплетов таким образом, что темплеты № 1÷3 и темплеты № 4÷6 примыкают друг к другу в азимутальном направлении. Расстояние между группами темплетов составляет ~ 2500 мм в азимутальном направлении (рисунок 7).

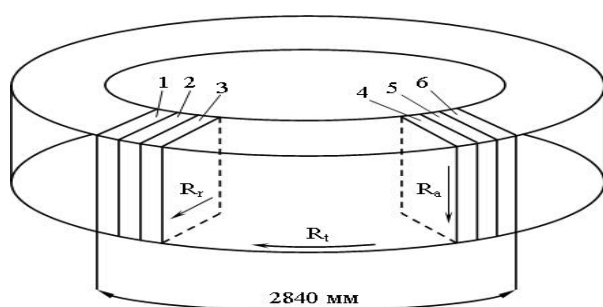


Рисунок 7 – Схема вырезки темплетов из пробного кольца обечайки зоны патрубков ОЗП-1

Из каждого темплета вырезаны заготовки под стандартные образцы Шарпи, как показано на рисунке 8.

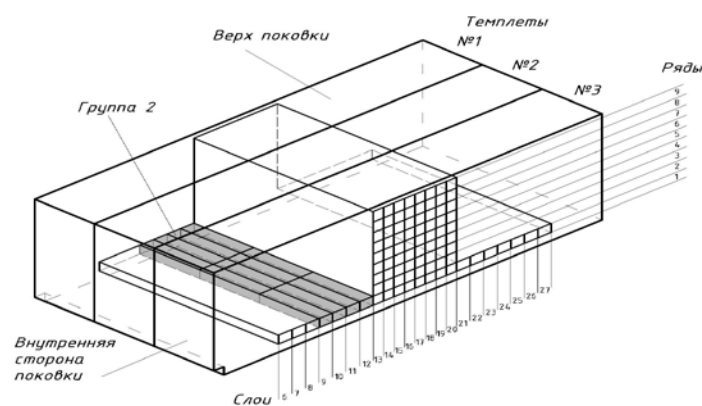


Рисунок 8 – Схема вырезки образцов из темплетов 1-3 и компоновка образцов Шарпи в группы

Группы образцов для испытания на ударный изгиб составлялись из 12 стандартных образцов Шарпи, вырезанных компактно в трех взаимно перпендикулярных направлениях. При исследовании распределения в одном из трех направлений, координаты двух других фиксировались. Всего было испытано 348 образцов Шарпи (29 групп). Маркировка предусматривает однозначную идентификацию положения каждого образца в пробном кольце. После проведения испытаний на ударный изгиб из половинок образцов Шарпи изготавливались разрывные образцы таким образом, чтобы образцы для исследования распределения в выбранном направлении имели одинаковые координаты в двух других направлениях, как показано на рисунке 9.

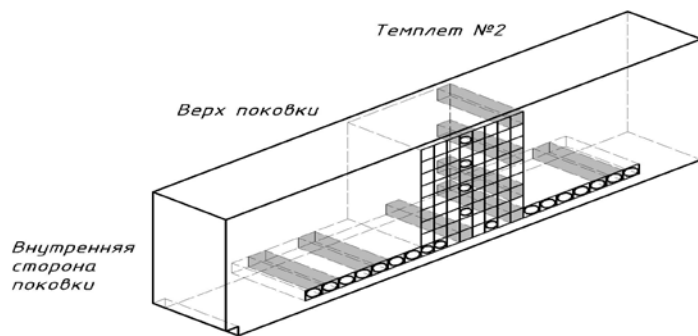


Рисунок 9 – Схема вырезки образцов из темплетов 1, 2, 3 для испытаний на статическое растяжение и исследование химического состава

Результаты химического анализа показали, что объем металла пробного кольца однороден по химическому составу. Содержание фосфора варьируется от 0,009% до 0,011%.

По результатам испытаний разрывных образцов закономерного распределения прочностных характеристик в радиальном и аксиальном направлениях не установлено. В аксиальном направлении значения предела текучести варьируется в интервале 550–590 МПа, а в радиальном направлении 570–580 МПа.

На рисунке 10 показаны аксиальное и радиальное распределения критической температуры хрупкости для групп образцов из темплетов 1-2-3 и 4-5-6.

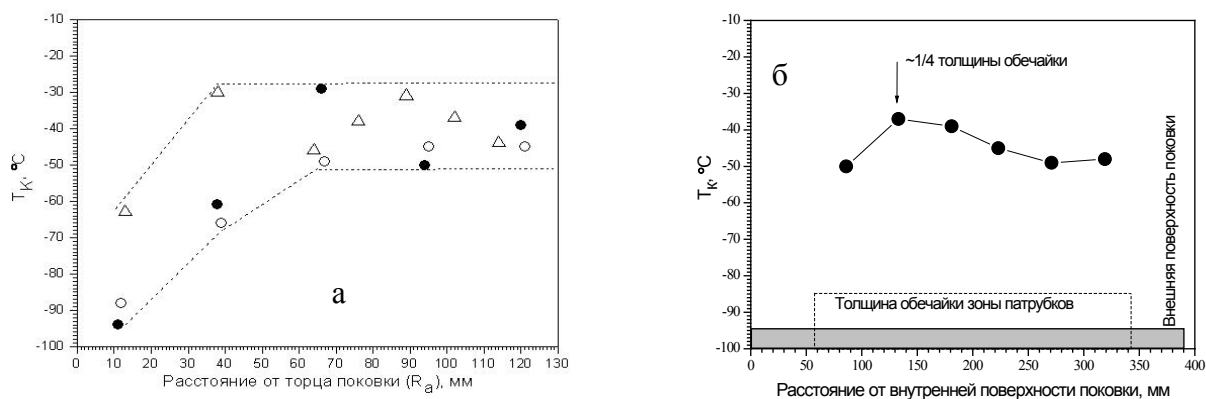


Рисунок 10 – Аксиальное (а) и радиальное (б) распределение критической температуры хрупкости в темплетах 1-2-3 и 4-5-6; на рисунке (а) каждое обозначение соответствует группам с одной радиальной координатой

Данные на рисунке 10а указывают на градиент в распределении T_k для всех исследованных координат. Под координатой в данном случае имеется в виду фиксированная пара (радиальная + азимутальная координата). Критическая температура хрупкости у торца обечайки значительно ниже, чем в объемах, удаленных от торца, и достигает значений минус 88 ÷ минус 93°C в темплетах 1-2-3 и –63°C для темплетов 4-5-6. На расстоянии большем 70 мм от торца поковки закономерное изменение T_k отсутствует. Образцы, вырезанные из нижней части темплетов пробного кольца, соответствуют металлу обечайки. Разность значений T_k в торцевой части пробного кольца и в объемах, примыкающих к обечайке, может достигать 65°C.

При изменении радиальной координаты от внутренней поверхности поковки к внешней наблюдается повышение T_k с минус 50°C до минус 37°C , а затем снижение до минус 48°C . Таким образом, в радиальном направлении есть закономерное распределение T_k по толщине с максимальным значением в толщине от нуля до четверти (рисунок 10б).

Таким образом, в пробном кольце имеет место закономерное изменение значений критической температуры хрупкости в радиальном и аксиальном направлениях. На торце пробного кольца наблюдается минимальное значение критической температуры хрупкости. При удалении от торца отмечается повышение значений T_k . Разность значений T_k в разных по высоте пробного кольца объемах может достигать 65°C .

Исследование распределения механических свойств в объеме обечайки

Для исследования аксиального распределения значений критической температуры хрупкости из обечайки зоны патрубков был вырезан блок К, по всей толщине готовой обечайки (рисунок 5б). Для оценки аксиального распределения T_k проводилось сопоставление значений критической температуры хрупкости для групп образцов с радиальной координатой $\frac{1}{2}$, одной и той же азимутальной координатой и различными аксиальными координатами. Дополнительно для анализа радиального и аксиального распределения T_k были использованы данные, из работы «WWER-1000 base metal reference steel and its characterization» авторов В. Acosta, L. Debarberis, S. Pirfo, F. Sevini, А. Kryukov, А. Chernobaeva, F Gillemot, M. Brumovsky, результаты которой были получены ранее при исследовании металла той же самой обечайки.

Результаты химического анализа показали, что закономерного распределения легирующих и примесных элементов по толщине и высоте обечайки не наблюдается. Изменения значений содержания легирующих элементов незначительны. Содержание фосфора изменяется от 0.09 до 0.011%.

Исследования показали, что, как и в пробном кольце, (месте вырезки образцов-свидетелей), так и в металле обечайки в радиальном направлении имеет место закономерное распределение значений T_k . Эти распределения схожи: при изменении радиальной координаты от внутренней поверхности обечайки (пробного кольца) наблюдается сначала повышение значений T_k , а затем понижение. Максимум значений T_k для обоих материалов наблюдается в местах $\sim\frac{1}{4}$ толщины обечайки. Аналогичные результаты ранее были получены и в других работах по исследованию распределения свойств в поковках.

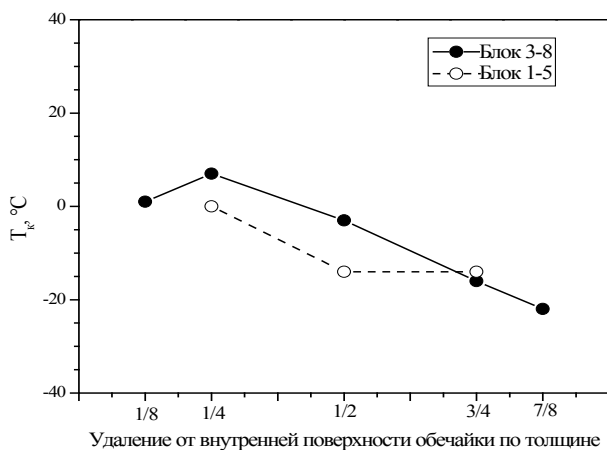


Рисунок 11 – Радиальное распределение критической температуры хрупкости в обечайке зоны патрубков (ОЗП-2)

Исследование аксиального распределения T_k в объеме обечайки показало отсутствие градиента, характерного для мест вырезки образцов-свидетелей. В качестве иллюстрации этого тезиса на рисунке 12 представлены разности значений T_k для групп образцов с одинаковыми радиальными и азимутальными координатами и различными аксиальными координатами.



Рисунок 12 – Значения разностей T_k для групп образцов с различными аксиальными, но одинаковыми радиальными и азимутальными координатами

Максимальная разность значений T_k не превышает 20°C . Металл обечайки существенно более однороден по высоте, чем места вырезки образцов-свидетелей, поскольку в нем нет закономерного изменения критической температуры хрупкости в аксиальном направлении.

Пробное кольцо является местом вырезки образцов-свидетелей. Для обеспечения однородности между группами образцов в радиальном направлении образцы-свидетели вырезаются в 6 слоев из средней трети по толщине пробного кольца. Для обеспечения однородности в аксиальном направлении на поковку при закалке накладывают тепловой барьер для изоляции торца от соприкосновения с охлаждающей средой. Результаты исследования распределения критической температуры хрупкости в аксиальном направлении в пробном кольце показывают, что тепловой барьер не обеспечивает однородности свойств в аксиальном направлении.

На заводе-изготовителе группы образцов-свидетелей составляются таким образом, чтобы в каждую группу вошло равное число образцов из каждого слоя по толщине. Образцы из разных слоев по высоте попадают в группы случайным образом. Система маркировки образцов не фиксирует аксиальную координату образца в пробном кольце. Поэтому группы образцов-свидетелей (контрольные и температурные) могут иметь в исходном состоянии различные свойства (например, T_{k0}). При различии в исходном состоянии T_k между контрольной и

температурными группами можно получить в результате положительное или отрицательное значение ΔT_k , особенно, если эффекты влияния температурного старения невелики.

Для того чтобы оценить разброс свойств, который уже присутствует в виде различий в исходной критической температуре хрупкости для контрольной и температурных групп, выполнен виртуальный эксперимент, симулирующий испытания образцов-свидетелей.

С этой целью были сформированы группы из результатов испытаний образцов Шарпи (по 12 штук) таким образом, что в каждую группу были включены по 2 образца из шести средних слоев поковки. Два образца из слоя с соответствующими им результатами испытаний, выбирались случайным образом из всей совокупности образцов, вырезанных из этого слоя, с разными координатами по высоте. Для реализации случайного выбора в каждом слое был использован генератор случайных чисел в программе *Excel*. Таким способом было сформировано 12 групп образцов Шарпи. Значения T_k для 12 групп составляли: минус 41, минус 42, минус 59, минус 41, минус 60, минус 58, минус 46, минус 43, минус 54, минус 43, минус 57, минус 34°C соответственно. Полученные данные, показывают следующее:

- 1) исходная критическая температура хрупкости для групп образцов, сформированных таким же образом, как и контрольные образцы-свидетели, не является консервативной оценкой T_k для обечайки; это значение может быть существенно ниже (минус 34–минус 60°C), чем критическая температура хрупкости металла обечайки в объеме от 0 до $\frac{1}{4}$ от внутренней поверхности обечайки (~ минус 30°C);
- 2) различия в значениях исходной критической температуры хрупкости для разных групп образцов, входящих в контрольный комплект и в температурные комплекты, может достигать 26°C.

Рассмотрен следующий виртуальный эксперимент в двух вариантах:

- Первый вариант – контрольным комплектом является группа с самой низким значением T_k (–60°C). Температурными группами являются группы № 1÷4 для 1÷4 выгрузок соответственно.

- Второй вариант – контрольным комплектом является группа с высоким значением T_k (–34°C). Температурными группами являются группы № 8÷11 для 1÷4 выгрузок соответственно.

- Сдвиги T_k (ΔT_k) на четырех комплектах заданы и равны соответственно: 10, 20, 30, 20, °C.

- Соответствующие комплекты выгружены через равные промежутки времени.

При выполнении вышеперечисленных условий для виртуальных температурных образцов-свидетелей получают данные, которые, представлены на рисунке 13.

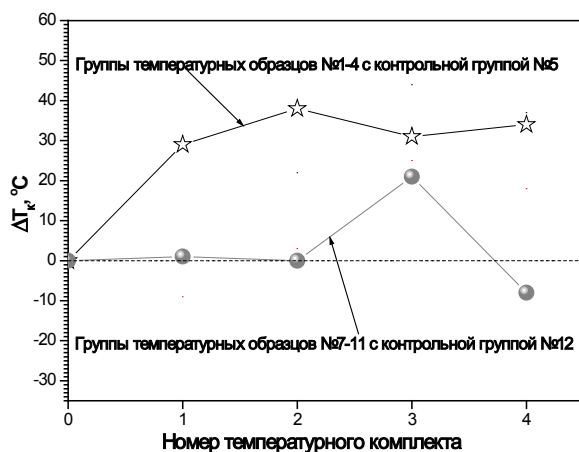


Рисунок 13 – Значения сдвигов T_k в виртуальном эксперименте с заданным законом изменения свойств. Звездочками обозначены сдвиги для образцов, для которых использовался КК с $T_{k0} = -60^\circ\text{C}$. Шариками обозначены сдвиги для образцов, для которых использовался КК с $T_{k0} = -34^\circ\text{C}$.

Максимальный сдвиг T_k в эксперименте с самым низким значением T_k в контрольной группе равен 38°C , и нет отрицательных значений сдвигов T_k . В эксперименте с самым высоким значением T_k в контрольной группе -21°C есть отрицательное значение сдвига T_k и максимальное значение сдвига равно 20°C .

Таким образом, закономерное распределение значений критической температуры хрупкости в радиальном и аксиальном направлениях в пробном кольце может вносить «шум» в результат исследований температурных образцов-свидетелей основного металла. Это не позволяет адекватно оценить эффекты температурного старения на основании исследования штатных образцов-свидетелей основного металла.

Для исследования влияния температурного старения на материалы основного металла предлагается провести исследования материалов основного металла на базе образцов-свидетелей с максимально возможным уменьшением вклада разброса свойств в исходном состоянии.

В четвертой главе выполнен анализ условий экспозиции температурных комплектов образцов-свидетелей ВВЭР-1000. Выбран объект исследования из металла контрольных и температурных образцов-свидетелей, позволяющий оценивать изменения механических свойств материалов корпусов ВВЭР-1000 в процессе длительных выдержек в интервале температур $310-320^\circ\text{C}$, с максимально возможным уменьшением вклада разброса свойств в исходном состоянии. Выполнена оценка эффективности выбранного объекта с точки зрения снижения вклада разброса свойств в исходном состоянии. Выполнена оценка изменения прочностных характеристик в результате температурного старения материалов основного металла ВВЭР-1000. Выполнена оценка изменения значений критической температуры хрупкости в результате температурного старения основного металла ВВЭР-1000.

Образцы-свидетели температурных комплектов расположены в блоках защитных труб, которые находятся выше верхней обечайки зоны патрубков. Температура экспозиции температурных комплектов образцов-свидетелей соответствует рабочей температуре элементов зоны патрубков ВВЭР-1000. Оценка температурных условий экспозиции образцов-свидетелей выполнена на основании статистического анализа данных штатных устройств,

регистрирующих температуру воды на выходе из обечаек зоны патрубков нескольких блоков ВВЭР-1000. Температуры воды на выходе из обечаек зоны патрубков в стационарном режиме эксплуатации находится в интервале 310–320°С. Температура эксплуатации элементов корпуса зоны патрубков и температура экспозиции температурных образцов-свидетелей также находится в этом температурном интервале. Температура экспозиции образцов считалась равной 310–320°С.

Для корректного исследования эффектов температурного старения основного металла корпусов ВВЭР-1000 металл образцов-свидетелей является наилучшим объектом, поскольку эти данные получены при фактических температурах эксплуатации и достаточно длительных экспозициях (десятки лет). Получить такие данные в результате специальных экспериментов практически невозможно.

В радиальном и аксиальном направлениях в местах вырезки образцов-свидетелей основного металла наблюдается закономерное распределение критической температуры хрупкости. Следовательно, при изготовлении образцов необходимо в первую очередь попытаться уйти от разбросов в этих двух направлениях. Как было показано выше, при использовании штатных образцов-свидетелей основного металла всегда будет присутствовать «шум» от разброса T_k в местах вырезки образцов-свидетелей. Предположительно «шум» может быть больше самих эффектов температурного старения. Таким образом, нужно стремиться к уменьшению вклада этого «шума».

Помимо образцов-свидетелей основного металла в программу образцов-свидетелей включены образцы сварного шва и зоны термического влияния. В образцах Шарпи зоны термического влияния надрез располагается по линии раздела основного металла и металла шва. Поэтому одна из половинок каждого образца зоны термического влияния представляет собой материал основного металла.

Образцы сварного шва и зоны термического влияния вырезаются из сварной пробы, получаемой путем сварки двух колец от штатных поковок корпусов ВВЭР-1000. В большинстве случаев это поковки, из которых изготовлена нижняя обечайка активной зоны, для сопровождаемого образцами-свидетелями корпуса. Образцы зоны термического влияния (ЗТВ) вырезаны на достаточно большом расстоянии от торца пробного кольца (не менее 200мм). По результатам исследований распределения свойств в аксиальном направлении в пробном кольце можно утверждать, что в объеме основного металла, прилегающего к металлу сварного шва, нет значительных разбросов значений критической температуры хрупкости, какие наблюдаются на торце пробного кольца.

Таким образом, для того, чтобы при исследовании эффектов температурного старения в основном металле ВВЭР-1000 на базе образцов-свидетелей максимально уменьшить вклад разброса свойств в исходном состоянии (в аксиальном и радиальном направлениях) в конечный результат,

необходимо использовать половинки основного металла от образцов зоны термического влияния одного слоя.

В данной работе использовались образцы-свидетели зоны термического влияния слоя Ж контрольных и температурных комплектов (рисунок 6). Этот прием позволяет одновременно зафиксировать и аксиальную координату вырезки образцов, так как часть образца всегда находится в металле сварного шва, и исключить разброс свойств в радиальном и аксиальном направлениях. При этом в полученные данные может быть внесен только разброс в азимутальном направлении, который по оценкам, выполненным в рамках отчета по проекту ВВЭР ТОИ, составляет $\sim 22^\circ\text{C}$ при 95% уровне доверительной вероятности.

Из половинок основного металла от испытанных образцов зоны термического влияния методом реконструкции изготавливались стандартные образцы Шарпи. Так же из этих половинок изготавливались образцы для испытаний на статическое растяжение. Для каждого состояния было испытано по 12 образцов Шарпи и 4 разрывных 5-кратных образца диаметром 3 мм.

Для подтверждения правильности выбора объекта исследования был проведен сравнительный анализ значений $T_{к0}$ для материалов ОМ (ЗТВ) и значений $T_{к0}$, полученных по результатам испытаний контрольных комплектов штатных образцов-свидетелей основного металла.

Для сравнения значений $T_{к0}$ все значения, полученные по результатам испытаний образцов ОМ (ЗТВ), были отсортированы по возрастанию. Аналогично были отсортированы значения $T_{к0}$, полученные по результатам испытаний штатных контрольных комплектов образцов-свидетелей основного металла. На рисунке 14 представлены значения $T_{к0}$ для групп образцов ОМ (ЗТВ) и штатных контрольных комплектов основного металла

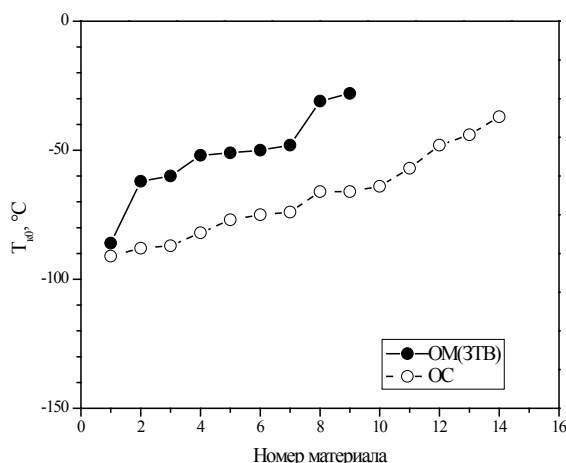


Рисунок 14 – Значения $T_{к0}$ для испытаний групп ОМ (ЗТВ) в исходном состоянии и основного металла из штатных контрольных комплектов образцов-свидетелей (ОС)

Данные, представленные на рисунке 14, показывают, что значения $T_{к0}$ групп образцов ОМ (ЗТВ) из контрольных комплектов выше, чем для штатных контрольных комплектов образцов-свидетелей основного металла. Среднее значение $T_{к0}$ для материалов ОМ (ЗТВ) равно минус 50°C , а для материалов основного металла образцов-свидетелей – минус 71°C .

Полученный результат дает основание считать, что оценка $T_{к0}$ по результатам испытаний штатных контрольных комплектов образцов-

свидетелей основного металла не консервативна. Это подтверждает вывод раздела 3 о неконсервативности оценок исходного состояния на основании испытаний штатных контрольных комплектов образцов-свидетелей основного металла.

Одним из показателей однородности металла является рассеяние экспериментальных значений энергии разрушения относительно серийной кривой. Для оценки рассеяния экспериментальных результатов относительно серийной кривой температурной зависимости работы разрушения в пределах одной группы образцов принято использовать 95% доверительный интервал. По его ширине можно судить о рассеянии экспериментальных точек относительно кривой.

Величина 95% доверительного интервала зависит от трех параметров: значения среднего квадратичного отклонения, количества определяемых параметров и количества экспериментальных точек. В данной работе при испытании всех групп образцов Шарпи было получено по 12 точек для каждой группы. При определении температурной зависимости для каждой группы неизвестными являются 2 параметра, которые определяются методом наименьших квадратов для нелинейной зависимости. Если два из трех параметров, от которых зависит величина 95% интервала, между любыми двумя группами испытаний совпадают, то сравнение рассеяния экспериментальных точек относительно серийной кривой можно проводить по величине среднего квадратичного отклонения.

Для сравнения рассеяния экспериментальных данных относительно серийной кривой были определены значения среднего квадратичного отклонения для групп образцов ОМ (ЗТВ) в исходном состоянии и для штатных контрольных комплектов образцов-свидетелей основного металла, в которых было испытано по 12 образцов Шарпи. Все значения были отсортированы по возрастанию. На рисунке 15 представлены результаты определения среднего квадратичного отклонения для групп образцов ОМ (ЗТВ) и образцов-свидетелей основного металла.

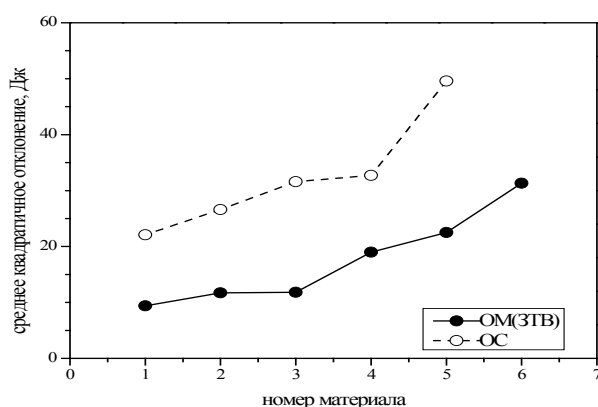


Рисунок 15 – Значения средних квадратичных отклонений для групп образцов ОМ (ЗТВ) и штатных контрольных комплектов образцов-свидетелей основного металла (ОС)

Данные, представленные на рисунке 15, показывают, что выбранный способ формирования групп образцов для исследования температурного старения существенно снижает рассеяние экспериментальных значений относительно серийной кривой. Этот результат также показывает

правильность выбора объекта для исследований влияния температурного старения с максимально возможным уменьшением вклада в результат разброса свойств в оценку эффектов температурного старения.

Поскольку исследования проводились на материалах основного металла из зоны термического влияния образцов-свидетелей контрольных и температурных комплектов, то времена температурной выдержки исследуемых материалов есть времена экспозиции температурных комплектов. Для исследованных в данной работе материалов минимальное значение времени выдержки ~ 35000 часов. Для того чтобы оценить изменения свойств в интервале времен от 0 до 40000 часов, в работе использовались данные испытаний образцов-свидетелей основного металла одного из эксплуатирующихся блоков. Корректность использования этих результатов определяется тем, что комплекты образцов-свидетелей основного металла этого блока были составлены достаточно компактно, и, следовательно, снижен вклад разброса T_k по толщине поковки, из которого вырезались образцы-свидетели. Для снижения вклада в результат радиального распределения свойств результаты испытаний разбиты на 2 группы образцов: в каждую группу входят образцы одного слоя. Следовательно, используется дополнительно два материала. Условное обозначение этого материалов принято «ОМ(ОС)-Е» и «ОМ(ОС)-Ж».

По результатам испытаний получена база данных изменения значений ΔT_T и $\Delta \sigma_{0,2}$ в зависимости от времени выдержки. На рисунке 16 представлены изменения значений ΔT_T и $\Delta \sigma_{0,2}$ в зависимости от времени выдержки для исследуемой базы данных.

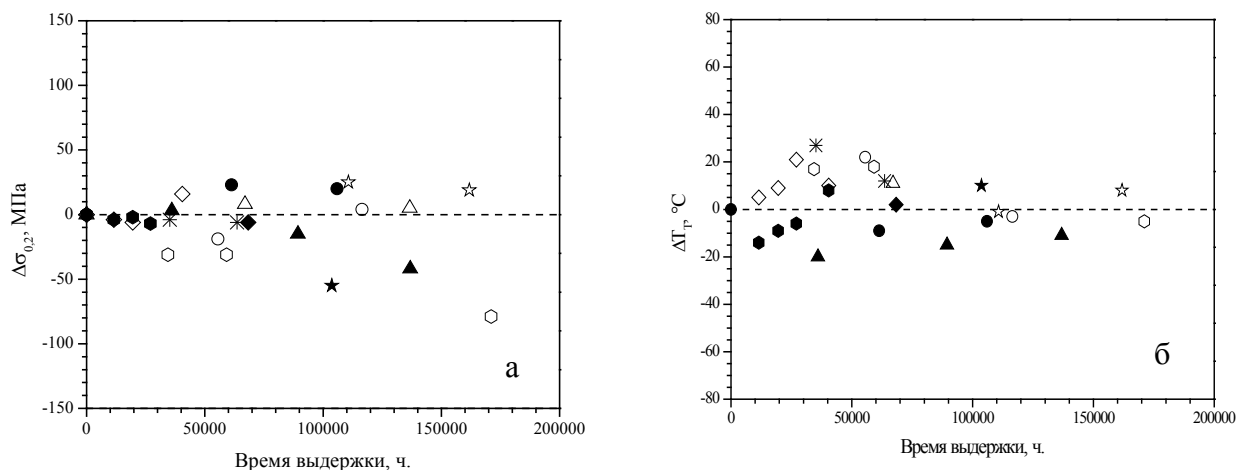


Рисунок 16 – Изменение значений $\Delta \sigma_{0,2}$ (а) и ΔT_T (б) в зависимости от времени температурной выдержки для исследуемых материалов; каждое обозначение соответствует одному материалу

Полученная в данной работе база данных включает 11 материалов, состоит из 24 значений $\Delta \sigma_{0,2}$ и 25 значений ΔT_T . Все экспериментальные точки относятся к интервалу 11000 – 180000 часов. В положительной области находится восемь значений $\Delta \sigma_{0,2}$ (от 3 до 23 МПа). В отрицательной области есть 15 значений $\Delta \sigma_{0,2}$ (от минус 61 МПа до минус 2 МПа). Четырнадцать

значений ΔT_T указывают на повышение T_T (от 2 до 27°C). Одиннадцать значений ΔT_T – на снижение T_T (от минус 3 до минус 20°C).

Качественная оценка результатов испытаний на статическое растяжение образцов исследуемых материалов позволяет предположить, что только для материалов ОМ (ЗТВ)-2, ОМ (ЗТВ)-3, ОМ(ЗТВ)-6 и ОМ (ОС)-Е наблюдается изменение предела текучести в результате длительных температурных выдержек относительно исходного состояния. Для проверки этого предположения для каждого материала была выполнена оценка коэффициента корреляции и его значимости. Полученные данные показывают, что коэффициенты корреляции имеют разный знак для разных материалов и все они незначимы. Дополнительно по общему файлу данных была выполнена проверка предположения о линейной зависимости $\Delta\sigma_{0,2}$ от времени. Для этого с помощью статистического пакета Eviews была выполнена оценка коэффициентов в соотношении:

$$\sigma_{0,2}=C(1)+C(2)\times t \quad (5)$$

где t – время выдержки,
 $C(1), C(2)$ – коэффициенты.

Оценка абсолютных значений коэффициентов и их значимости показала, что коэффициент $C(2)$ равен минус 0,0001, т.е. незначим. Следовательно, можно сделать вывод об отсутствии линейной зависимости между $\Delta\sigma_{0,2}$ и продолжительностью выдержки в интервале температур 310-320°C в исследованном интервале времен (до 180000 часов).

Поскольку для материала и ОМ (ЗТВ)-6 выявлено максимальное уменьшение предела текучести при длительных температурных выдержках, то для этого материала отдельно были определены коэффициенты в соотношении (5) и их значимость. Полученные данные указывают на то, что коэффициент $C(2)$ – значимый для материала ОМ (ЗТВ)-6. Такой результат обосновывает важность исследования прочностных характеристик при временах температурной выдержки больших 200000 часов, поскольку значимое снижение предела текучести материалов корпусов ВВЭР-1000 при эксплуатации недопустимо.

Таким образом, можно сделать предположение о том, что при длительных температурных выдержках основного металла не происходит значимого изменения предела текучести на временном интервале от 11000 до 180000 часов.

В нескольких литературных источниках указывается, что для стали 15Х2НМФА-А характерна временная зависимость изменения значений ΔT_T с максимумом после длительных температурных выдержках при температурах 350–450°C. Данные, представленные на рисунке 16б, показывают, что с учетом предположения о том, что изменения во времени значений ΔT_T , описываемое кривой с максимумом, его координата расположена в интервале времен 35000 ÷ 56000 часов. Для оценки полученной базы данных изменения T_T весь временной

интервал был разбит на два отрезка по трем вариантам: 0–35184, 35184–180000, 0–40464, 40464–180000 и 0–55512, 55512–180000 часов (рисунок 17).

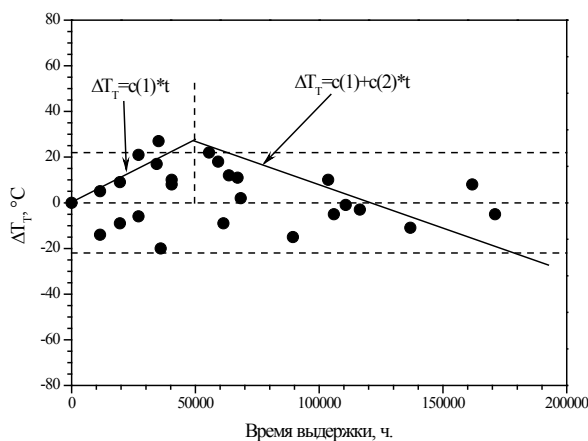


Рисунок 17 – Схема разбиения временного интервала зависимости T_T от времени выдержки на 2 отрезка.

Для каждого интервала были определены коэффициенты корреляции T_T – время для восходящей части кривой и нисходящей части кривой и их значимость.

Подтверждением правильности использования зависимости с максимумом при описании изменения критической температуры хрупкости является событие, когда коэффициенты корреляции на восходящей и нисходящей частях кривой одновременно значимы, причем первый из них положителен, а второй отрицателен. В таблице 2 приведены результаты определения коэффициентов корреляции для пар значений T_T – время выдержки и ΔT_T – время выдержки

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции между значениями T_T – время выдержки и ΔT_T – время выдержки

	Точка разбиения , ч.	Значение коэффициента корреляции,	
		Предположительно восходящая часть	Предположительно нисходящая часть
Сдвиги, ΔT_T	35184	0,64	0,33
	40464	0,31	0,45
	55512	0,43	0,41
Абсолютные значения, T_T	35184	0,23	-0,07
	40464	0,32	-0,19
	55512	0,32	-0,03

В таблице 2 жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции. Видно, что условие одновременной значимости коэффициентов корреляции на восходящей и нисходящей частях кривой не выполняется ни для одного из способа разбиения на временные интервалы.

Полученные результаты не подтвердили возможность описания данных зависимостью с максимумом.

Визуальная оценка данных, представленных на рисунке 15 позволяет сделать предположение о том, что, либо на всем временном интервале нет изменения T_T , либо наблюдается их снижение. Для проверки этих

предположения T_T были определены коэффициенты линейного уравнения и их значимость.

Результаты определения коэффициентов линейных уравнений изменения T_T показали, что коэффициенты уравнений незначимы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в пределах полученной базы данных в интервале времен от 11000 до 180000 часов значимое изменения критической температуры хрупкости не установлено.

Для оценки зависимости изменения T_T от различных факторов проведена оценка коэффициентов корреляции.

Коэффициент корреляции между изменением T_T и значениями $T_{к0}$ значим. Коэффициент корреляции между изменением T_T и изменением предела текучести незначим.

Таким образом, во всем исследованном диапазоне времен изменение предела текучести отсутствуют, и, следовательно, упрочняющего (или разупрочняющего) механизма температурного старения не выявлено. Корреляция не выявил зависимости между изменением ΔT_T от $\Delta \sigma_{0,2}$ отсутствует. Изменение тонкой структуры в процессе длительных выдержек при температурах эксплуатации не выявлено.

При отсутствии упрочняющего (или разупрочняющего) механизма изменения свойств при температурном старении единственный механизм, который может обуславливать изменение значений ΔT_T , – образование сегрегаций фосфора по границам зерен. Следствием образования сегрегаций фосфора по границам зерен должно быть монотонное повышение значений T_T . В пределах полученной базы данных (составов материалов и времен экспозиции) такое повышение T_T не установлено.

Чтобы выявить влияние сегрегационного механизма на изменение ΔT_T в результате температурного старения, необходимо провести дополнительные исследования при более длительных временах выдержек (более 180000 часов).

Необходимо отметить, что содержание фосфора в металле образцов-свидетелей не соответствует содержанию фосфора в обечайках зоны патрубков, которые изготовлены из стали 15Х2НМФА. Содержание фосфора в некоторых из них, в соответствии с паспортными данными на корпуса реакторов, достигает 0.017%. В связи с этим по результатам настоящей работы нельзя оценить вклад в изменение критической температуры хрупкости от образования сегрегаций по границам зерен для обечаек зоны патрубков. Это является предметом отдельного исследования.

Выводы

Проведен анализ причин разброса данных штатных температурных образцов-свидетелей основного металла ВВЭР-1000. Для этого выполнено исследование распределения свойств в местах вырезки образцов-свидетелей основного металла (в пробном кольце) и в металле обечайки. Выполнен анализ экспозиции температурных комплектов образцов-свидетелей. Проведено исследование эффектов температурного старения на образцах основного

металла из образцов зоны термического влияния для максимально возможного уменьшения вклада разброса свойств в исходном состоянии между группами образцов. По результатам работы можно сделать ряд выводов:

1. В местах вырезки образцов-свидетелей основного металла и в объеме обечайки в радиальном направлении существует закономерное распределение значений критической температуры хрупкости. Наблюдается повышение и снижение значений T_k при изменении радиальной координаты от внутренней поверхности обечайки (поковки) к внешней. Закономерное распределение T_k связано с различной скоростью охлаждения объемов металла вблизи поверхностей поковки и внутренних объемов.

2. В местах вырезки образцов-свидетелей основного металла обечайки наблюдается градиент значений T_k в аксиальном направлении. Для объемов, прилегающих к торцу пробного кольца, характерны минимальные значения T_k , которые могут превышать значения T_k в объемах, удаленных от торца, на 65°C . На расстоянии более 70 мм от торца градиент значений T_k в аксиальном направлении не наблюдается.

3. В металле обечайки градиент T_k в аксиальном направлении отсутствует. Металл обечайки более однороден, чем металл пробного кольца, из которого вырезают образцы-свидетели.

4. Закономерное изменение свойств в радиальном и аксиальном направлениях в местах вырезки образцов-свидетелей может приводить к существенному разбросу данных ΔT_k при исследовании влияния температурного старения на базе образцов-свидетелей основного металла, что не позволяет создать адекватную модель для прогнозирования изменения свойств основного металла в результате температурного старения и приводит к сверхконсервативным оценкам температурного старения и радиационного охрупчивания основного металла ВВЭР-1000.

5. Анализ условий экспозиции показал, что температурно-временные параметры экспозиции ($310\text{--}320^\circ\text{C}$) температурных комплектов образцов-свидетелей ВВЭР-1000 полностью соответствует условиям эксплуатации обечайки зоны патрубков верхней.

6. Предложен способ получения данных для исследования температурного старения основного металла ВВЭР-1000 из металла температурных комплектов образцов-свидетелей, позволяющий оценивать эффекты температурного старения с максимально возможным снижением вклада разброса свойств в исходном состоянии в конечные результаты испытаний.

7. Анализ исходного состояния показал, что значения T_{k0} для штатных образцов основного металла контрольных комплектов образцов свидетелей значительно ниже, чем для основного металла из зоны термического влияния.

8. Предложенный метод изготовления образцов для исследования эффектов температурного старения существенно снижает рассеяние экспериментальных результатов относительно сериальных кривых, построенных на основании испытаний образцов Шарпи, что подтверждает эффективность выбранной стратегии в снижении вклада разброса свойств в конечный результат.

9. Анализ полученной базы данных, в процессе выдержки при температурах эксплуатации (310–320°C) в интервале от 11000 до ~180000 часов показал следующее:

- 9.1 Закономерное изменение предела текучести и критической температуры хрупкости не установлено.
- 9.2 Не выявлена корреляция между изменением предела текучести и изменением критической температуры хрупкости.
- 9.3 Отсутствие значимого повышения (снижения) предела текучести во всем диапазоне времен исключает наличие упрочняющего (разупрочняющего) механизма в исследованном диапазоне времен.
- 9.4 Наличие как положительных и отрицательных значений $\Delta\sigma_{0,2}$ и ΔT_T , по-видимому, связано с разбросом свойств в исходном состоянии между образцами, входящими в разные комплекты (контрольные и температурные).

Необходимо отметить, что содержание фосфора в металле образцов-свидетелей не соответствует содержанию фосфора в металле обечаек зоны патрубков, которые изготовлены из стали 15X2НМФА и содержание фосфора в некоторых из них в соответствии с паспортными данными на корпуса реакторов достигает 0,017%. В связи с этим по результатам настоящей работы нельзя оценить вклад в изменение критической температуры хрупкости от образования сегрегаций по границам зерен для обечаек зоны патрубков. Это является предметом отдельного исследования.

Основное содержание диссертации представлено в следующих публикациях

1. «Исследование распределения механических свойств в обечайке зоны патрубков» (Д.А. Журко, М.А. Скундин, А.А. Чернобаева, Е.А. Красиков, К.И. Медведев), материалы конференции молодых специалистов в ОАО ОКБ Гидропресс, Россия, г. Подольск, 16-17 марта 2011 г.
2. «Исследование распределения свойств в обечайках корпуса реактора АЭС в необлученном состоянии» (М.А. Скундин, А.А. Чернобаева, Д.А. Журко, Е.А. Красиков, К.И. Медведев), Журнал «Деформация и разрушение материалов», выпуск №10, 2011 г., с. 41-45
3. «Использование образцов-свидетелей для определения термического охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000» (Ю.А. Николаев, М.А. Скундин, Д.А. Журко) материалы конференции молодых специалистов в ОАО ОКБ Гидропресс, Россия, г. Подольск, 21-22 марта 2012 г.
4. «Анализ причин разброса данных температурных образцов-свидетелей основного металла ВВЭР-1000» (А.А. Чернобаева, Ю.А. Николаев, М.А. Скундин, Д.А. Журко, Е.А. Красиков, К.И. Медведев, В.Н. Костромин, Г.В. Дробков, С.В. Рязанов), статья принята к публикации в журнал «Атомная энергия», том 113, выпуск №6, 2012 г., с.337-344
5. «Определение термического старения материалов корпусов ВВЭР-1000 на основе результатов исследований образцов-свидетелей» (М.А. Скундин, Ю.А.

Николаев А.А. Чернобаева, Д.А. Журко Е.А. Красилов), материалы VI-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур», НИТУ МИСиС, г. Москва, 17-19 апреля 2012 г., с. 203

6. «Анализ причин разброса данных образцов-свидетелей основного металла ВВЭР-1000» (Чернобаева А.А., Николаев Ю.А., Скундин М.А., Журко Д.А., Красилов Е.А., Медведев К.И., Костромин В.Н., Дробков Г.В., Рязанов С.В.), материалы Международной научно-технической конференции «Конструкционная прочность и ресурс оборудования АЭС», ИПП НАН Украины, г. Киев, 2-5 октября 2012 г., с.243-245

7. «Разработка способа контроля характеристик основного металла корпусов ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации по образцам-свидетелям для минимизации вклада разброса свойств в исходном состоянии» (А.А. Чернобаева, В.Б. Папина, М.А. Скундин, Д.Ю. Ерак), материалы школы-конференции «Материалы перспективных реакторных установок: разработка и применение», НИЯУ МИФИ, г. Звенигород, 29 октября - 2 ноября 2012 г., с.131-132

8. «Исследование распределения свойств в местах вырезки образцов-свидетелей основного металла и в объеме обечайки» (А.А. Чернобаева, К.И. Медведев, М.А. Скундин, Д.Ю. Ерак), материалы школы-конференции «Материалы перспективных реакторных установок: разработка и применение», НИЯУ МИФИ, г. Звенигород, 29 октября - 2 ноября 2012 г., с.124