

Параметры корреляционной зависимости вязкости от температуры, среднеквадратичное отклонение, температурный интервал измерений и число измерений

Образец	Молярный состав, % (в скобках номер образца)	$A, \text{м}^2/\text{с}$	$E_A, \text{К}$	$T_{\text{ср}}, \text{К}$	$10^6 \sigma, \text{м}^2/\text{с}$	$\Delta T, \text{К}$	Число измерений
1	73LiF—27BeF ₂	2,773	3263,9	1003	0,065	882—1172	122
2	0,99(1) + 1CeF ₃	2,15	1706	1009	0,048	872—1207	155
3	0,98(2) + 2ZrF ₄	1,943	1936,2	965,6	0,189	859—1077	47
4	0,96(2) + 4ZrF ₄	1,951	2248,6	958,4	0,087	818—1119	90

вано влияние добавок трифторида церия и тетрафторида циркония на вязкость. Показано, что для всех составов полученная вязкость хорошо описывается экспоненциальной зависимостью от обратной абсолютной температуры. Для каждого состава определены параметры этой зависимости. Добавление трифторида церия в количестве 1% мольной доли к исходной композиции снижает вязкость при низкой температуре. Последующее добавление тетрафторида циркония заметно снижает температуру ликвидуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ignatiev V., Feynberg O., Gnidoi I. e.a. Molten salt actinide recycler and transforming system without and with Th—U support. Fuel cycle flexibility and key material properties. — Ann. Nucl. Energy, 2014, v. 64, p. 408—420.
2. Phase Diagrams of Nuclear Reactor Materials. Ed. R. Thoma. Rep. ORNL-2548, 1959.
3. Десятник В., Нечаев В., Червинский Ю. Вязкость расплавленных смесей фторида бериллия с фторидами лития и натрия. — Журн. прикладной химии, 1981, т. 54, вып. 10, с. 2310—2312.
4. Janz G. NIST Standard Reference Database 27. Version 2.0, 1992.
5. Abalin S., Asmolov V., Daragan V. e.a. Corium kinematic viscosity measurement. — Nucl. Engng Design, 2000, v. 200, № 1—2, p. 107—115.
6. Merzlyakov A., Ignatiev V., Abalin S. Viscosity of LiF—NaF—KF eutectic and effect of cerium trifluoride and uranium tetrafluoride additions. — Ibid., 2014, v. 278, p. 268—273.

Поступила в Редакцию 25.12.17

УДК 621.039.524.4+620.22+538.9

МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ ВВЭР-440, -1000 В ЦИКЛЕ ОБЛУЧЕНИЕ—ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ОТЖИГ—ОБЛУЧЕНИЕ

*Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Мальцев Д.А., Семченков Ю.М., Фролов А.С., Штромбах Я.И.
(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва), Шутиков А.В. (АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва)*

Основным элементом ядерной энергоустановки, лимитирующим ее ресурс, является корпус реактора вследствие несменяемости. В связи с этим обоснование продления ресурса ядерного энергоблока, главным образом, включает обоснование работоспособности металла сварных швов и основных металлов, в том числе расположенных в зоне термовлияния нагревательного устройства в интервале 400—580 °С, а также экспериментальной оценки повторного радиационного охрупчивания материалов.

НИЦ «Курчатовский институт» является научным руководителем проектов реакторных

установок ВВЭР, включая продление их срока службы. В настоящей статье систематизированы данные об обосновании и опыте продления срока службы корпусов ВВЭР, накопленные в НИЦ «Курчатовский институт» в течение более 30 лет.

Как следует из оценки экономической эффективности, продление срока службы блока АЭС, не требующее капитальных вложений, связано с существенно меньшим расходом средств по сравнению со строительством нового блока. Срок эксплуатации ВВЭР-440 серий 179 и 230 закончился еще в начале 1990-х годов.

Основным компенсирующим мероприятием является отжиг радиационно-охрупченных зон корпуса реактора — металла сварного шва № 4. Для продления срока службы корпусов ВВЭР-440 был проведен отжиг металла сварных швов, характеризующихся повышенным по сравнению с основным металлом содержанием примесей [1, 2]. В настоящее время возникла необходимость повторного продления срока службы материалов корпусов ВВЭР-440. Это особенно актуально для ВВЭР-440 первого поколения с повышенным содержанием примесей. Поскольку для них не была предусмотрена программа образцов-свидетелей, свойства металла сварных швов и обечаек в процессе эксплуатации оцениваются на основании исследования тонких темплетов, вырезанных с внутренней поверхности корпуса [3, 4]. Благодаря получению фактических данных о металле корпуса после отжига эксплуатация 3-го, 4-го энергоблока Нововоронежской, первых двух Кольской АЭС была продлена до 45 лет. Выполненный в НИЦ «Курчатовский институт» комплекс исследований и методических разработок позволил предложить для некоторых корпусов реакторов дополнительный отжиг наиболее критичных элементов и создать необходимый задел для обоснования эксплуатации корпусов ВВЭР-440 первого поколения до 60 лет.

Восстановительный отжиг корпусов ВВЭР-1000 для продления их срока службы до 60 лет обусловлен тем, что некоторые сварные швы с максимальным содержанием никеля характеризуются более высоким радиационным охрупчиванием, ограничивающим ресурс [5, 6].

Настоящая работа является частью комплексных исследований технологии отжига и посвящена оценке механизмов деградации структуры и свойств стали корпусов ВВЭР-440, -1000 в процессе эксплуатации, восстановления исходного структурного состояния после отжига и повторного радиационного охрупчивания.

Следует отметить, что разработка восстановительного отжига корпусов ВВЭР является комплексным проектом, который включает расчетную и экспериментальную оценку прочности и защитных свойств плакировки корпусов, его опорных конструкций из бетона. В НИЦ «Кур-

чатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» выполнено материаловедческое обоснование допустимости выбранного режима с точки зрения работоспособности антикоррозионной наплавки при дальнейшей эксплуатации корпуса реактора после отжига, в АО ОКБ «Гидропресс» и АО «Атомэнергопроект» — расчетное обоснование безопасности предложенной технологии с точки зрения сохранения целостности и работоспособности корпуса и окружающих конструкций, в АО НПО «ЦНИИТмаш» совместно с ООО НПФ «ТерМИКС» под научным руководством НИЦ «Курчатовский институт» разработано и изготовлено оборудование для восстановительного отжига и проведено расчетное обоснование принятых технических решений.

Перечисленные работы проведены при финансовой поддержке АО «Концерн Росэнергоатом».

Критерии выбора температурно-временных параметров восстановительного отжига стали корпусов ВВЭР-440, -1000. Деградация свойств корпусной стали может быть вызвана действием двух механизмов — упрочняющего и неупрочняющего [7—9]. Первый из них обусловлен увеличением предела текучести при облучении — упрочнением за счет образования радиационно-индуцированных преципитатов и радиационных дефектов, второй, характерный для стали с о.ц.к.-решеткой, — развитием обратной отпускной хрупкости (образованием сегрегации примесей, прежде всего, фосфора на границах зерен и/или на межфазных границах различных выделений). Поэтому выбор восстановительного отжига металла сварных швов основан на комплексном исследовании особенностей механизмов, определяющих деградацию их структуры и свойств при эксплуатации.

При выборе режима отжига на основе исследований восстановления исходной структуры стали ВВЭР-440, -1000 были решены следующие задачи:

оценена полнота растворения радиационно-индуцированных упрочняющих элементов структуры после отжига методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии [8, 10—12];

разработана методика оценки склонности материалов к развитию отпускной хрупкости по изучению зернограницных сегрегаций методами фрактографического анализа и оже-электронной спектроскопии [13];

определены структурные критерии выбора режима восстановительного отжига стали с повышенным содержанием меди для ВВЭР-440 и никеля для ВВЭР-1000 [11, 12].

При выборе режима восстановительного отжига на основе исследований механических характеристик были решены следующие задачи:

оценена эффективность выбранного режима по степени восстановления исходной критической температуры хрупкости [1, 10, 11];

исследовано влияние технологических допусков по температуре, а также флюенса быстрых нейтронов, накопленного при первичном облучении, на восстановление критической температуры хрупкости к исходному состоянию [11, 14];

показано отсутствие снижения свойств основного металла, находящегося в том числе в зоне термовлияния нагревательного устройства при отжиге металла сварных швов [14];

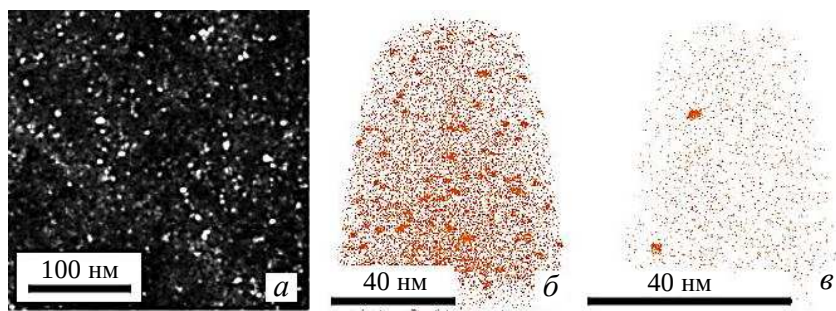
показана возможность продления срока службы корпусов ВВЭР-1000 на 30 лет после восстановительного отжига металла сварных швов, подтвержденная повторным ускоренным облучением [11, 12, 14].

Разработка режима восстановительного отжига стали корпусов ВВЭР-440 на основе исследования их радиационной повреждаемости. Склонность материалов корпусов ВВЭР-440 первого поколения к радиационному охрупчиванию определяется, в основном, химическим составом — большим содержанием фосфора и меди в составе металла шва, усиливающим склонность материала к радиационному охрупчиванию. Именно сварные швы являются критичными элементами, определяющими ресурс ВВЭР-440, так как содержание меди в материале шва превышает ее предел растворимости в матрице ($>0,1\%$ по массе) [15]. Поэтому при облучении медь выделяется из матрицы, образуя преципитаты, обогащенные медью. Выделение меднообогащенных преципитатов по мере повышения флюенса быстрых нейтронов

продолжается до тех пор, пока концентрация меди в матрице не снизится до предела растворимости, после чего образование преципитатов заметно снижается [8, 16].

Основным механизмом радиационного охрупчивания материала шва ВВЭР-440 является упрочняющий, вызванный повышением предела текучести вследствие образования и увеличения плотности радиационно-индуцированных меднообогащенных преципитатов и радиационных дефектов — дислокационных петель [8, 11]. При этом плотность преципитатов в 10 раз больше плотности радиационных дефектов, что определяет их преимущественный вклад в радиационное упрочнение. Действие второго возможного механизма деградации свойств — неупрочняющего механизма радиационного охрупчивания, связанного с образованием зернограницных сегрегаций, не проявляется в металле сварных швов из-за наличия по границам зерен избыточных выделений легированного феррита с малой растворимостью в нем примесных элементов, в частности, фосфора [11].

Особенности химического состава и структурного состояния, а также механизмов радиационного охрупчивания позволили сформулировать основное требование к параметрам отжига металла сварного шва ВВЭР-440 — для восстановления исходной структуры и свойств металла шва необходимо проводить отжиг при температуре и времени выдержки (с учетом технологической возможности) для растворения только радиационно-индуцированных элементов структуры — преципитатов и радиационных дефектов. Таким режимом для металла сварного шва, расположенного напротив активной зоны, был выбран штатный — температура $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ /выдержка 150 ч. Было показано [8, 16], что после восстановительного отжига по штатному режиму наблюдается полное растворение радиационных дефектов и значительное, но неполное растворение меднообогащенных радиационно-индуцированных преципитатов (рис. 1). При этом наблюдается только частичный возврат меди в матрицу, остальная оставшаяся от растворения преципитатов часть меди участвует в коагуляции нерастворенных преципитатов малой плотности. При этом медь перестает являть-



Р и с. 1. Электронно-микроскопическое изображение precipитов после первичного облучения (а) и распределение меди в металле сварного шва ВВЭР-440 после облучения (б) и восстановительного отжига по штатному режиму (в)

ся критичным элементом для радиационного охрупчивания.

Следствием отжига структуры материала шва является восстановление предела текучести и критической температуры хрупкости, что явилось достаточным для продления срока службы ВВЭР-440 до 45 лет [16].

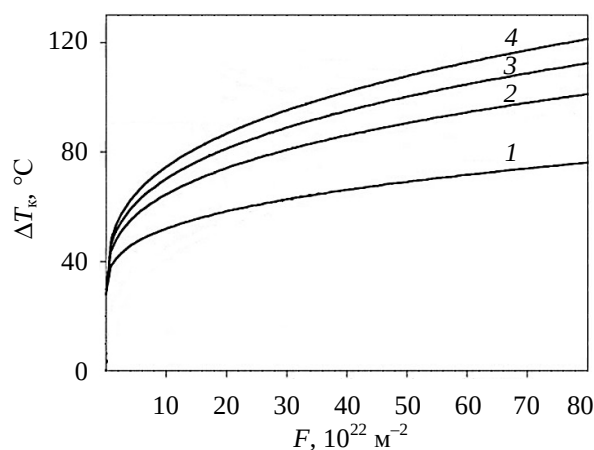
Разработка режима восстановительного отжига стали корпусов ВВЭР-1000 на основе исследований их радиационной повреждаемости. Из-за повышенного содержания никеля в некоторых металлах сварных швов (до 2%), который образует зернограничную сегрегацию с фосфором, действуют оба механизма радиационного охрупчивания: упрочняющий за счет образования радиационных дефектов и радиационно-индуцированных precipитов и неупрочняющий за счет образования зернограничной сегрегации фосфора и никеля. В стали ВВЭР-1000 радиационно-индуцированные precipитаты обогащены никелем, марганцем и кремнием — легирующими элементами, матричное содержание которых не исчерпывается. Это объясняет монотонный рост плотности precipитов по мере увеличения флюенса быстрых нейтронов до проектного. В материале шва ВВЭР-1000 образование обогащенных никелем precipитов при облучении не сопровождается заметным уменьшением его содержания в матрице из-за большой концентрации [10].

Анализ химического состава и кинетики накопления радиационно-индуцированных элементов структуры, ответственных за деградацию свойств материала шва ВВЭР-1000 с максимальным содержанием никеля $\geq 1,6$ —1,7% по массе в пределах паспортного состава, показывает, что необходим восстановительный отжиг

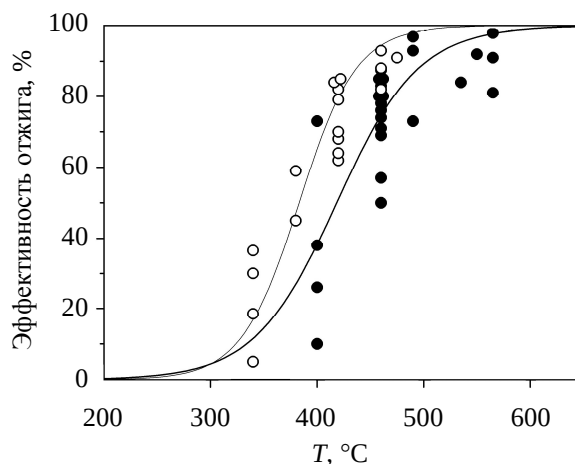
для продления срока службы до 60 лет (рис. 2). При этом различия механизмов деградации структуры и свойств материала шва ВВЭР-440, -1000 не позволили применить для ВВЭР-1000 режим восстановительного отжига, разработанный для ВВЭР-440, пробный отжиг материала шва ВВЭР-1000 по режиму отжига ВВЭР-440 показал его низкую эффективность (рис. 3).

Различия в режимах отжига обусловлены:

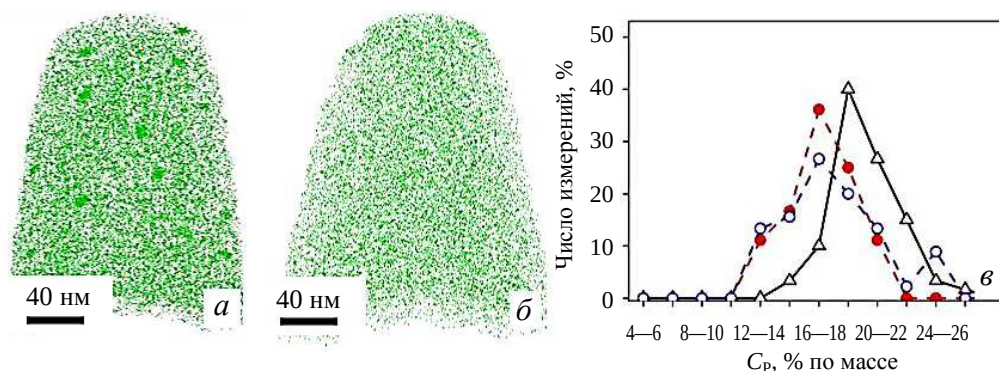
значительным вкладом зернограничной сегрегации фосфора (обратимой отпускной хрупкости) в радиационное охрупчивание материала шва ВВЭР-1000 по сравнению с ВВЭР-440, где обратимой отпускной хрупкости при облучении не наблюдается [11]. Отжиг (растворение) зер-



Р и с. 2. Дозовая зависимость сдвига критической температуры хрупкости стали корпуса ВВЭР-1000 с содержанием никеля 1,21 (1), 1,6 (2), 1,76 (3), 1,88% по массе (4)



Р и с. 3. Температурная зависимость эффективности отжига стали корпусов ВВЭР-440 (○) и ВВЭР-1000 (●)



Р и с. 4. Распределение никеля в металле сварного шва корпуса ВВЭР-1000 после облучения (а) и отжига по штатному режиму (б), концентрация фосфора в границах зерен образцов-свидетелей металла сварного шва ВВЭР-1000 при облучении до флюенса $40,9 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ (Δ), облучении до флюенса $19 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ и отжиге по штатному режиму ($\bullet$), облучении до флюенса $40,9 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ и отжиге по штатному режиму ($\circ$)

нограничной сегрегации фосфора протекает при температуре выше температурного интервала максимального развития обратимой отпускной хрупкости (550°C и более);

необходимостью максимально полного восстановления структуры и свойств материала шва ВВЭР-1000. Для ВВЭР-440 характерно снижение содержания меди в матрице (твердом растворе) из-за образования при облучении обогащенных медью преципитатов. После отжига по штатному режиму наблюдается неполный возврат меди в матрицу и, как следствие, снижение радиационного охрупчивания при повторном облучении [8, 16]. В ВВЭР-1000 образование обогащенных никелем преципитатов не сопровождается заметным уменьшением содержания никеля в матрице из-за значимо большей исходной концентрации никеля в них. Вследствие этого после отжига при повторном облучении никель вновь участвует в образовании преципитатов [10, 17].

Индивидуальный подход при выборе режима отжига необходим для каждой стали с характерными для нее химическим составом, структурным состоянием и условиями эксплуатации. Применительно к металлам сварных швов ВВЭР-1000 был выбран и обоснован режим восстановительного отжига при 565°C в течение 100 ч с технологическими допусками по температуре $\pm 15^\circ\text{C}$ (штатный режим).

Скорость охлаждения после выдержки при температуре отжига должна соответствовать скорости охлаждения после последнего отпуска при штатной термообработке заготовок для

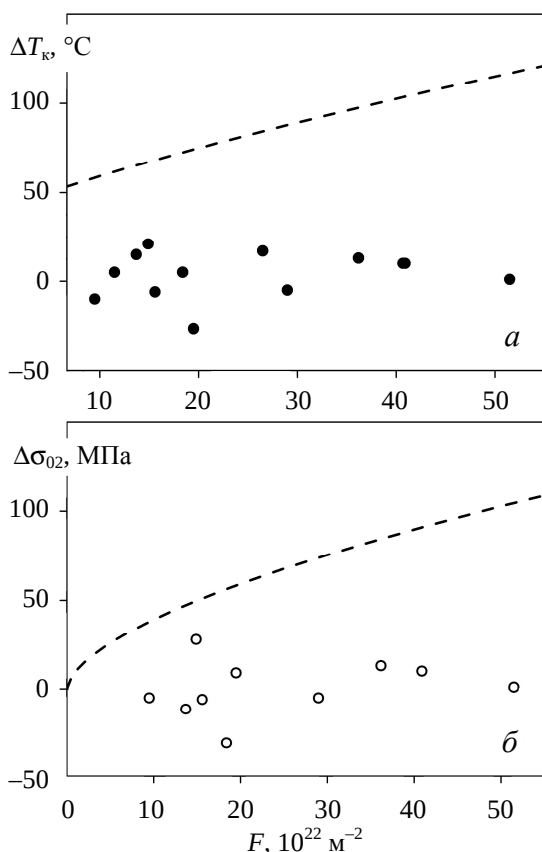
корпуса реактора. Она обеспечивает почти полное отсутствие повторного накопления сегрегаций при прохождении опасного интервала температуры интенсивного образования зернограницной сегрегации.

Эффективность режима отжига обоснована по результатам исследования механических свойств и структурного состояния образцов-свидетелей энергоблоков ВВЭР-1000 с разным содержанием никеля в металле сварных швов (1,54—1,89% по массе) и, в первую очередь, 1-го блока Балаковской АЭС:

наблюдается восстановление структуры и свойств металла сварных швов после отжига по штатному режиму с технологическими допусками по температуре $\pm 15^\circ\text{C}$ — полное исчезновение радиационно-индуцированных элементов структуры (рис. 4, а, б) и значительное растворение зернограницной сегрегации (рис. 4, в), что позволило почти полностью восстановить механические свойства (рис. 5);

выявлено влияние флюенса быстрых нейтронов при первичном облучении на степень восстановления структуры и свойств материалов при отжиге. Показано, что отжиг восстанавливает структурное состояние и механические характеристики независимо от времени предшествующей эксплуатации корпуса реактора (см. рис. 5 [14]);

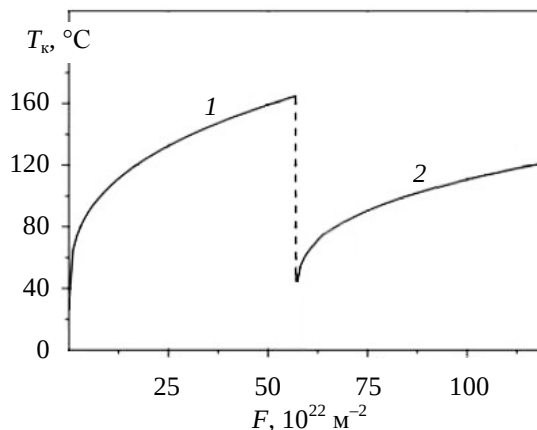
исследовано изменение структуры и свойств основного металла, поскольку отжиг предусматривает одновременный нагрев металла сварных швов № 3 и 4. Нагреву подвергается обечайка, расположенная между ними, обечай-



Р и с. 5. Остаточное охрупчивание облученного металла сварных швов корпусов ВВЭР-1000 после восстановительного отжига по штатному режиму: *a*, *б* — восстановление критической температуры хрупкости и предела текучести соответственно; - - - — нормативная зависимость для облученного состояния

ки, расположенные выше и ниже отжигаемых сварных швов, находятся в зоне градиента температуры, реализуемого при отжиге. Отжиг основного металла в интервале 400—580 °C не ухудшает структуру и свойства основного металла за сравнительно короткое время восстановительного отжига.

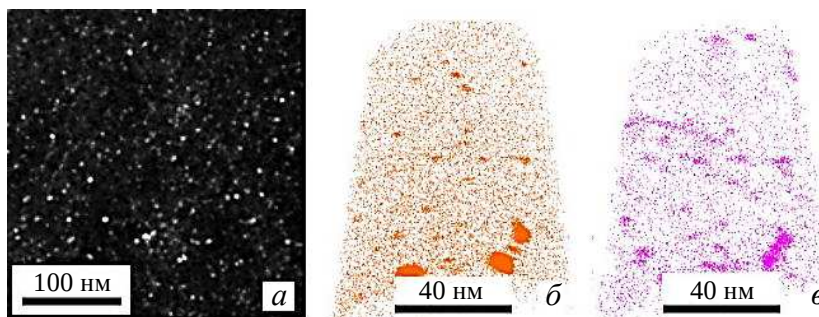
Повторное радиационное охрупчивание стали корпусов ВВЭР-440, -1000 после отжига. При обосновании длительной эксплуатации корпуса после отжига необходимо прогнозирование изменения структурного состояния, прочностных свойств и критической температуры хрупкости материала при последующем за отжигом повторном облучении. Исследования показали, что темп повторного радиационного охрупчивания металла сварных швов ВВЭР-440 существ-



Р и с. 6. Схема радиационного охрупчивания металла сварного шва корпуса ВВЭР-440 при первичном (1) и повторном облучении (2)

венно ниже первичного вследствие меньшей плотности преципитатов на основе меди и фосфора, образовавшихся при повторном облучении (рис. 6, 7). Снижение влияния меди на повторное охрупчивание обусловлено ее неполным возвратом в твердый раствор при отжиге и, как следствие, меньшей концентрацией в преципитатах при повторном облучении.

Изменение свойств металла сварных швов ВВЭР-1000 при повторном охрупчивании оценивали по результатам ускоренного облучения в исследовательском реакторе ИР-8. На механические свойства металла сварных швов ВВЭР-1000 при облучении в отличие от ВВЭР-440 влияет плотность потока быстрых нейтронов [17]. Вследствие этого при анализе повторного охрупчивания металла сварных швов ВВЭР-1000 сделана поправка на разницу между плотностью потока быстрых нейтронов при ускоренном облучении и облучении образцов-свидетелей в соответствии с результатами [12, 18]:

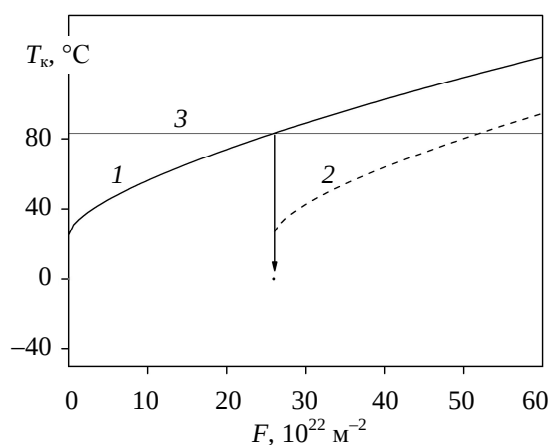


Р и с. 7. Преципитаты в металле сварного шва корпуса ВВЭР-440 после повторного облучения: электронно-микроскопическое изображение (*a*), распределение меди (*б*) и фосфора (*в*)

$$\Delta T_F^H = 1,25 \Delta T_F^B,$$

где ΔT_F^H — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие облучения низкой плотностью потока быстрых нейтронов; ΔT_F^B — сдвиг критической температуры хрупкости вследствие облучения высокой плотностью потока быстрых нейтронов.

Анализ показал, что основной причиной разницы в результатах, полученных при облучении высокой и низкой плотностью потока быстрых нейтронов металла сварных швов ВВЭР-1000, является разница во времени облучения. Для ускоренно облученных образцов характерно малое время выдержки (примерно в 100 раз меньше по сравнению с образцами-свидетелями), при котором радиационно-стимулированная диффузия не успевает реализоваться в полной мере и соответственно уровень зернограницной сегрегации значительно ниже. Исследования не выявили принципиальной разницы в деградации структуры металла сварных швов ВВЭР-1000 при первичном и повторном ускоренном облучении (с учетом влияния плотности потока быстрых нейтронов). Указанные закономерности изменения структуры при повторном после восстановительного отжига ускоренном облучении обусловили механические характеристики. Зависимости показывают, что повторное радиационное охрупчивание металла сварных швов ВВЭР-1000 не выше первичного (рис. 8). Таким образом, исследования структурного состояния и механических свойств



Р и с. 8. Схема радиационного охрупчивания металла сварного шва корпуса ВВЭР-1000 при первичном (1) и повторном облучении (2): 3 — предельное допустимое охрупчивание

показали возможность продления срока службы подвергнутой восстановительному отжигу стали корпусов ВВЭР-1000 примерно еще на один ресурс, т.е. суммарно до 60 лет.

Закключение. Таким образом, установлены критерии выбора температурно-временных параметров восстановительного отжига металла сварных швов корпусов ВВЭР-440, -1000 на основе действующих механизмов их радиационного охрупчивания. Основным механизмом радиационного охрупчивания металла сварного шва корпуса ВВЭР-440 является упрочняющий, вызванный повышением предела текучести вследствие образования и увеличения плотности радиационно-индуцированных обогащенных медью преципитатов и радиационных дефектов при отсутствии образования зернограницной сегрегации в границах зерен. После восстановительного отжига металла сварного шва корпуса ВВЭР-440 по режиму температура 475 °С/выдержка 150 ч наблюдается полное растворение радиационных дефектов и существенное, но неполное растворение радиационно-индуцированных обогащенных медью преципитатов. При этом наблюдается значительное восстановление предела текучести и критической температуры хрупкости T_k (ΔT_k после отжига ≤ 20 °С), что достаточно для продления срока их службы.

В металле сварных швов корпуса ВВЭР-1000 из-за повышенного содержания никеля в некоторых до 2% возможны оба механизма радиационного охрупчивания. Это приводит к тому, что для необходимого растворения зернограницной сегрегации фосфора температура должна быть выше температурного интервала максимального развития обратимой отпускной хрупкости. После восстановительного отжига металла сварных швов корпуса ВВЭР-1000 по режиму температура 565 °С/выдержка 100 ч наблюдается почти полное исчезновение радиационно-индуцированных элементов структуры, а также существенное растворение зернограницной сегрегации, что обусловило почти полный возврат механических свойств.

После восстановительного отжига металла сварного шва корпуса ВВЭР-440 наблюдается снижение повторного охрупчивания, обусловленное меньшей плотностью преципитатов, обогащенных фосфором и медью. Для материалов

корпуса ВВЭР-1000 повторное радиационное охрупчивание не выше, чем при первичном облучении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев Ю.А., Николаева А.В., Кеворкян Ю.Р. Восстановление свойств облученной стали при термическом отжиге. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 6, с. 457—460.
2. Platonov P.A., Nikolaev Y.A., Shtrombakh Y.I. Radiation embrittlement kinetics of the first generation of VVER-440 RVPs after post-irradiation annealing. — Intern. J. Press. Vessel. Pip., 2002, v. 79, № 8—10, p. 643—648.
3. Kryukov A., Platonov P., Shtrombakh Ya. e.a. Investigation of samples taken from Kozloduy unit 2 reactor pressure vessel. — Nucl. Engng Des., 1996, v. 160, № 1—2, p. 59—76.
4. Korolev Yu., Kryukov A., Nikolaev Yu. e.a. The properties of WWER-440 type reactor pressure vessel steels cut out from operated units. — Ibid., 2000, v. 195, № 2, p. 137—142.
5. Margolin B.Z., Nikolayev V.A., Yurchenko E.V. e.a. Analysis of embrittlement of WWER-1000 RPV materials. — Intern. J. Press. Vessel. Pip., 2012, v. 89, p. 178—186.
6. Margolin B.Z., Nikolaev V.A., Yurchenko E.V. e.a. A new approach to description of in-service embrittlement of WWER-1000 reactor pressure vessel materials. — Strength Mater., 2010, v. 42, № 1, p. 2—16.
7. Fukuya K. Current understanding of radiation-induced degradation in light water reactor structural materials. — J. Nucl. Sci. Technol., 2013, v. 50, № 3, p. 213—254.
8. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Алеев А.А. и др. Исследование тонкой структуры материала сварного шва с высоким содержанием фосфора корпуса реактора ВВЭР-440 после облучения, отжига и повторного облучения. — Ядерная физика и инжиниринг, 2013, т. 4, № 1, с. 73—82.
9. Eason E., Odette R., Nanstad R. e.a. A physically-based correlation of irradiation-induced transition temperature shifts for RPV steels. — J. Nucl. Mater., 2013, v. 433, № 1—3, p. 240—254.
10. Miller M.K., Chernobaeva A.A., Shtrombakh Ya.I. e.a. Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing. — Ibid., 2009, v. 385, № 3, p. 615—622.
11. Gurovich B., Kuleshova E., Shtrombakh Ya. e.a. Evolution of weld metals nanostructure and properties under irradiation and recovery annealing of VVER-type reactors. — Ibid., 2013, v. 434, p. 72—84.
12. Штромбах Я.И., Гурович Б.А., Кулешова Е.А. и др. Экспериментальная оценка эффективности восстановительного отжига корпусов ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 4, с. 205—213.
13. Kuleshova E.A., Gurovich B.A., Lavrukina Z.V. e.a. Assessment of segregation kinetics in water-moderated reactors pressure vessel steels under long-term operation. — J. Nucl. Mater., 2016, v. 477, p. 110—122.
14. Gurovich B., Kuleshova E., Shtrombakh Ya. e.a. Evolution of microstructure and mechanical properties of VVER-1000 RPV steels under re-irradiation. — Ibid., 2015, v. 456, p. 373—381.
15. Odette G., Yamamoto T., Klingensmith D. On the effect of dose rate on irradiation hardening of RPV steels. — Philos. Mag., 2005, v. 85, № 4—7, p. 779—797.
16. Ерак Д.Ю., Папина В.Б., Чернобаева А.А. и др. Радиационное охрупчивание материалов корпусов ВВЭР-440 после отжига. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 2, с. 67—78.
17. Ballesteros A., Ahlstrand R., Bruynooghe C. e.a. Irradiation temperature, flux and spectrum effects. — Prog. Nucl. Energy, 2011, v. 53, № 6, p. 756—759.
18. Erak D.Yu., Zhurko D.A., Papina V.B. Interpretation of accelerated irradiation results for materials of WWER-1000 reactor pressure vessels. — Strength Mater., 2013, v. 45, № 4, p. 424—432.

Поступила в Редакцию 12.03.18

УДК 621.039.4

КОНТРОЛЬ МАССЫ И РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ В ТВЭЛАХ С УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ НИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Алеева Т.Б., Кожин А.Ф., Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Халитов Р.Р., Тарасов Б.А.
(НИЯУ МИФИ, г. Москва), Глушенков А.Е., Липатов А.П., Давыдов А.В., Соломатин И.Д.
(АО «ВНИИНМ», г. Москва)

В технологической цепочке производства твэлов из смешанного уран-плутониевого нитридного топлива необходимо контролировать массу и равномерность распределения плутония по длине топливного столба, изотопный состав

плутония и отношение U/Pu, Am/Pu, Np/Pu. Гамма-спектроскопия высокого разрешения — единственный неразрушающий метод, который позволит решить комплекс поставленных задач. В настоящей работе исследовали возможности