

Раздел второй

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 538.9

СТРУКТУРНЫЕ КРИТЕРИИ ВЫБОРА РЕЖИМА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

Б.А. Гурович, Я.И. Штромбах, Е.А. Кулешова, С.В. Федотова

*Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва, Россия,
E-mail: evgenia-orm@yandex.ru, факс +7(499)196-17-01, тел. +7(499)196-92-15*

На основании структурных критериев выбран и обоснован режим восстановительного отжига сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 с повышенным содержанием никеля (более 1,65 %), обеспечивающий продление срока службы проблемных корпусов до 60 и более лет.

ВВЕДЕНИЕ

Длительная эксплуатация водо-водяных реакторов в условиях повышенной температуры и реакторного облучения приводит к деградации свойств корпусных материалов, выражающейся в сдвиге температуры вязкохрупкого перехода. Радиационное охрупчивание корпусных сталей обусловлено структурными изменениями, происходящими в материалах под облучением: радиационным упрочнением в результате образования радиационных дефектов и радиационно-индуцированных преципитатов (обогащенных, согласно данным атомно-зондовой томографии [1], в основном, никелем, марганцем и кремнием в металле сварных швов реакторов ВВЭР-1000 и никелем и марганцем – в основном металле), а также образованием зернограничных сегрегаций фосфора (развитием обратимой отпускной хрупкости). Различия в химических составах сталей корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 определяют и разницу в кинетике радиационного охрупчивания этих материалов. Так, если для корпусов реакторов ВВЭР-440 медь и фосфор являются основными элементами, влияющими на кинетику охрупчивания, то в случае реакторов ВВЭР-1000 наиболее высокий темп охрупчивания обнаружен в материалах с предельно высоким содержанием никеля (особенно в металле сварных швов, где предельное содержание никеля может достигать 1,99 %). Темп радиационного охрупчивания таких сварных швов выше, чем материалов корпуса реактора ВВЭР-440, что реализуется непрерывным ростом по мере облучения плотности радиационно-индуцированных Ni-Mn-Si-обогащенных преципитатов, а также усилением сегрегационных процессов. В результате радиационное охрупчивание образцов-свидетелей металла сварных швов корпуса реакторов ВВЭР-1000 с высоким содержанием никеля (более 1,65 %) оказалось выше нормативного [2]. По этой причине такие сварные швы являются наиболее критичными элементами, ограничивающими срок службы корпуса и установки в целом.

В настоящее время во всем мире стоит задача продления срока службы корпуса реактора до 60 и более лет. Для реакторов ВВЭР-1000 обоснование продления срока службы в случае низкого содержа-

ния никеля в металле сварных швов можно осуществить посредством переаттестации материалов действующих корпусов до более высокого флюенса, а для ряда корпусов с высоким содержанием никеля (более 1,65 %) для продления срока службы наряду с конструктивными решениями необходимо проведение восстановительного отжига критичных сварных швов (расположенных напротив центра активной зоны и вследствие чего подверженных наибольшей радиационной нагрузке). Подобный способ восстановления свойств металла сварных швов был успешно применен для корпусов реакторов ВВЭР-440, однако различия в химическом составе, конструкциях и условиях эксплуатации требуют для корпусов реакторов ВВЭР-1000 выбора других температурно-временных режимов восстановительного отжига.

Поскольку радиационное охрупчивание обусловлено структурными изменениями, происходящими в материалах под облучением, выбор режима восстановительного отжига определяется требованием выполнения следующих структурных критериев, а именно:

- растворения образовавшихся под облучением радиационных дефектов и радиационно-индуцированных преципитатов;
- снижения или отсутствия увеличения уровня зернограничных сегрегаций;
- отсутствия увеличения темпа накопления радиационно-индуцированных изменений структуры и увеличения уровня зернограничных сегрегаций при повторном после восстановительного отжига облучении.

Для оценки эффективности отжига и определения достижимого радиационного ресурса при последующей эксплуатации отожженных корпусов необходимо подтвердить высокую степень восстановления свойств при выбранном температурно-временном режиме, а также исследовать кинетику радиационного охрупчивания при повторном облучении. Эта задача наиболее эффективно реализуется при ускоренном повторном облучении образцов материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000, прошедших восстановительный отжиг, до флюенса, соответствующего 60-летнему сроку службы корпу-

са, например, в исследовательском реакторе ИР-8. При этом плотность потока быстрых нейтронов ($E > 0,5$ МэВ) на два-три порядка величины превышает значения, характерные для стенки корпуса, поэтому при анализе результатов ускоренного облучения должно быть учтено возможное влияние плотности потока быстрых нейтронов так называемого «эффекта флакса».

Исходя из структурных параметров и особенностей химического состава в работе выбраны температурно-временные режимы восстановительного отжига материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 с высоким содержанием никеля на примере металла сварного шва Балаковской АЭС, блок 1 (Бал. АЭС-1) и Калининской АЭС, блок 1 (Клн. АЭС-1) (1,89 и 1,76 % никеля соответственно). Эффективность восстановительного отжига доказана результатами испытаний и исследований образцов после повторного ускоренного облучения до флюенса, соответствующего продлению срока службы до 60 и более лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовались образцы металла сварных швов с высоким содержанием никеля (более 1,65 %) как материалы с наиболее высоким темпом радиационного охрупчивания и требующие проведения восстановительного отжига корпусов блоков реакторов ВВЭР-1000. Химический состав этих материалов приведен в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав исследованных материалов

Элемент	СШ Св-10ХГНМАА	
	Бал. АЭС-1	Клн. АЭС-1
C	0,06	0,04
Si	0,33	0,28
Mn	0,99	0,98
Cr	1,74	1,71
Ni	1,89	1,76
Mo	0,67	0,66
Cu	0,03	0,04
S	0,019	0,006
P	0,011	0,010
V	0,01	-

Важно отметить, что содержание никеля в исследованных образцах находится на верхнем пределе диапазона, характерного для материалов подобного типа, и определяет их высокую степень радиационного охрупчивания. Содержание меди и фосфора невелико и соответствует средним значениям для материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000.

Первично облученные образцы представляют собой образцы-свидетели третьих лучевых комплектов корпусов реакторов ВВЭР-1000 (Балаковской АЭС, блок 1 и Калининской АЭС, блок 1). На повторное после отжига ускоренное облучение в каналы исследовательского реактора ИР-8 устанавливались половинки испытанных образцов-свидетелей тех же комплектов. Параметры облучения показаны в табл. 2.

Таблица 2
Параметры облучения образцов

Материал	F, 10^{22} м ⁻²	T, °C	ϕ , ($\times 10^{14}$), с ⁻¹ ·м ⁻²
Первичное облучение образцов-свидетелей размером 10×10×55 мм			
Бал. АЭС-1	34,4	295	2...4
Клн. АЭС-1	44,3	295	2...4
Повторное после отжига облучение малоразмерных образцов 5×5×27,5 мм (изготовлены из образцов-свидетелей)			
Бал. АЭС-1	50,0		1760
	28,5	289	206
Клн. АЭС-1	28,8		206

Сдвиг критической температуры хрупкости определяли по результатам испытаний образцов Шарпи или мини-Шарпи с V-образным надрезом.

Фрактографическим исследованиям подвергали половинки испытанных на ударный изгиб образцов. Поверхности разрушения исследовали на рентгеновском микроанализаторе SXR-50 в радиоактивном исполнении (фирма "Самеса", Франция), установленном в защитной камере. Долю участков с различным типом разрушения в общей поверхности излома после испытаний при различных температурах оценивали методом Глаголева [3]. Относительная погрешность определения доли хрупкого разрушения в поверхностях разрушения образцов при фрактографических исследованиях не хуже 10...15 %.

Трансмиссионные электронно-микроскопические исследования проводили с использованием электронного микроскопа TECHNAI-200 (FEI, США) при ускоряющем напряжении 200 кВ. При определении плотности радиационных дефектов и преципитатов измеряли толщину образца на исследуемом участке с использованием метода дифракции электронов в сходящемся пучке [4]. При этом относительная погрешность измерений не хуже 10...15 %.

ПРЕДПОСЫЛКИ ВЫБОРА РЕЖИМА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА

Режим отжига выбирался для металла сварного шва Балаковской АЭС, блок 1 с последующей проверкой для Калининской АЭС, блок 1.

Таблица 3
Предел текучести образцов после различных режимов отжига Бал. АЭС, блок 1

Состояние	ΔR_{p02} , МПа
Исходное	0
Облучение	95
Отжиг 490 °C/10ч	19
Отжиг 530 °C/10ч	20
Отжиг 530 °C/15ч	22
Отжиг 530 °C/30ч	28
Отжиг 550 °C/10ч	11
Отжиг 550 °C/30ч	3

При выборе температуры восстановительного отжига были проведены предварительные отжиги металла сварного шва Балаковской АЭС, блок 1 с измерением предела текучести (табл. 3). Видно, что уже после отжига при 500 °С наблюдается снижение сдвига предела текучести до исходных значений.

Для значительного растворения радиационных дефектов и радиационно-индуцированных преципитатов достаточно температуры отжига 475 °С, которая используется при проведении восстановительного отжига сварных швов реакторов ВВЭР-440. Однако температура отжига для минимизации развития сегрегационных процессов должна быть выше «носа» С-образной кривой (температурного интервала максимального развития обратимой отпускной хрупкости). Как известно [5], повышение содержания никеля в корпусных сталях реакторов ВВЭР-1000 по сравнению с материалами ВВЭР-440 (которое было осуществлено для улучшения прокаливаемости) способствует увеличению темпа охрупчивания за счет усиления процессов отпускной хрупкости.

На рис. 1 приведены температурно-временные диаграммы изотермического охрупчивания Cr-Ni-Mo-сталей (по данным [6]).

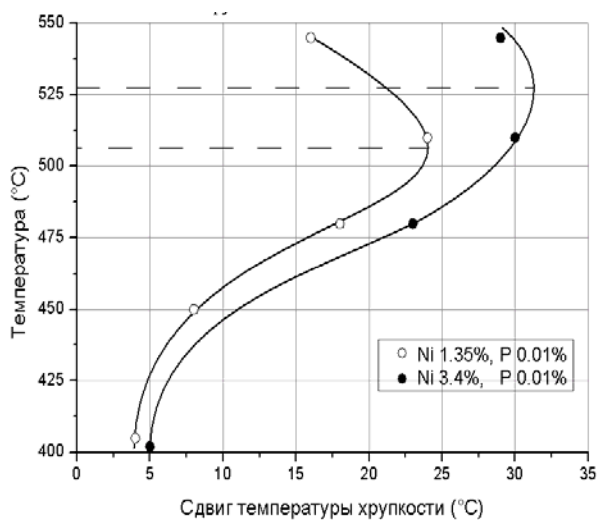


Рис. 1. Зависимость температуры максимального проявления обратимой отпускной хрупкости от содержания никеля в стали (выдержка 100 ч)

Видно, что для сталей корпусов ВВЭР-1000 с содержанием никеля 1...3 % максимум охрупчивания (так называемый «нос» С-образной кривой) приходится на интервал 510...530 °С. Таким образом, температура восстановительного отжига сварных швов реакторов ВВЭР-1000 с повышенным содержанием никеля (более 1,65 %) должна быть выше этих значений, но в допустимых пределах с точки зрения конструктивных особенностей корпуса.

Поскольку измерение предела текучести показало, что практически полный возврат, т.е. растворение радиационно-индуцированных преципитатов и радиационных дефектов для металла сварного шва Балаковской АЭС наблюдается уже при отжиге при температурах 530...550 °С, основным лимитирующим фактором при выборе режима отжига, который

обеспечивает восстановление свойств до уровня, необходимого для продления срока службы до 60 лет, является развитие отпускной хрупкости.

Исходя из изложенных выше соображений для выбора режима отжига исследовались следующие режимы обработки образцов металла сварного шва Балаковской АЭС, блок 1: режим 1 – 535 °С в течение 100 ч; режим 2 – в интервале температур 535...580 °С в течение 30 ч; режим 3 – в интервале температур 535...580 °С в течение 100 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ ВВЭР-1000

Анализ результатов испытаний и фрактографических исследований образцов, отожженных при различных режимах, позволил выбрать такой режим отжига, который, наряду с высокой степенью возврата структуры и свойств, минимизировал бы развитие сегрегационных процессов в материале.

Об охрупчивании по механизму образования сегрегаций примесей на границах зерен под облучением судят по появлению в изломах образцов после ударных испытаний участков хрупкого межзеренного разрушения наряду с участками скола, квазискола и вязкого транскристаллитного разрушения, характерных для необлученного состояния.

В сталях с ОЦК-решеткой появление в изломах образцов хрупкого межзеренного характера разрушения обычно связано с развитием обратимой отпускной хрупкости, которая обусловлена сегрегацией на границы зерен примесей (прежде всего - фосфора). Развитие обратимой отпускной хрупкости определяется термодинамическими и диффузионными параметрами, которые при данных температуре и времени выдержки обеспечивают заметную сегрегацию примесей на границах зерен [5]. Принято считать, что радиационно-стимулированная диффузия фосфора и большая длительность процесса облучения приводят к тому, что образование подобных сегрегаций наблюдается при более низких температурах, чем это характерно для развития обратимой отпускной хрупкости в сталях без облучения, а именно, при рабочих температурах корпусов реакторов (~290 °С). Таким образом, наличие в изученных образцах участков с хрупким межзеренным характером разрушения свидетельствует об образовании в стали зернограницных сегрегаций фосфора.

Результаты фрактографических исследований металла сварного шва Балаковской АЭС, блок 1 приведены в табл. 4.

При фрактографических исследованиях для каждого состояния исследовали несколько образцов с определением доли структурных составляющих и среднего размера зерна в изломе. Для дальнейшего анализа были отобраны образцы с близкими средними значениями размеров зерен (100...150 мкм), испытанные при температурах в интервале максимального проявления хрупкого межзеренного разрушения. Это обусловлено влиянием размера зерна на долю хрупкого межзеренного разрушения: чем больше размер зерна, тем больше, при прочих равных условиях, доля хрупкого межзеренного разрушения. Значение доли хрупкого межзеренного раз-

рушения для этих образцов и было приписано для каждого состояния.

Таблица 4

Доля хрупкого межзеренного разрушения по результатам фрактографических исследований Балаковской АЭС, блок 1 (средний размер зерна 100...150 мкм)

Состояние	$F, 10^{22} \text{ м}^{-2}$	Бал. АЭС-1 $\eta, \%$
Исходное	0	5
Первичное облучение	34,4	20
Отжиг по режиму 1	34,4	25
Отжиг по режиму 2	34,4	20
Отжиг по режиму 3	34,4	5
Повторное сверхускоренное облучение	50,0	5
Повторное ускоренное облучение	28,5	5

Доля хрупкого межзеренного разрушения наряду со сдвигами температуры хрупкости и предела текучести в различных состояниях для металла сварного шва Балаковской АЭС-1 показаны на рис. 2 (результаты механических испытаний взяты из [7]).

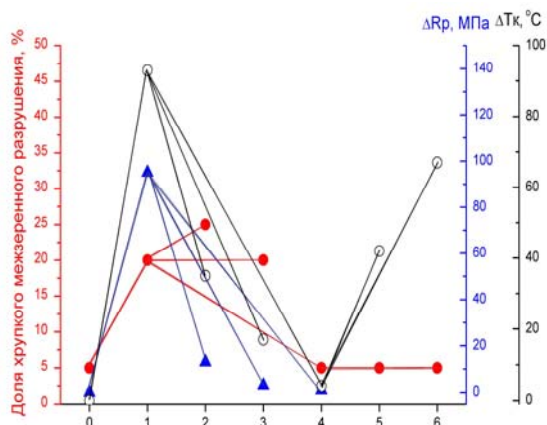


Рис. 2. Изменение доли хрупкого межзеренного разрушения, сдвига предела текучести и температуры хрупкости при различных режимах отжига и повторном ускоренном облучении металла сварного шва Бал. АЭС, блок 1: 0 – исходное состояние; 1 - первичное облучение; 2 – отжиг по режиму 1; 3 - отжиг по режиму 2; 4 – отжиг по режиму 3; 5 - повторное ускоренное облучение; 6 – повторное сверхускоренное облучение

Из табл. 3 и рис. 2 видно, что первичное облучение до флюенса $34,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ приводит к повышению предела текучести и температуры хрупкости, а также к образованию сегрегаций фосфора на границах зерен в изученном сварном шве (наблюдается до 20 % хрупкого межзеренного разрушения в изломах испытанных образцов).

Отжиг при температуре 535 °С в течение 100 ч приводит к увеличению доли хрупкого межзеренного разрушения в поверхностях разрушения образцов, т.е. к увеличению уровня зернограницных сегрегаций. Температура отжига при таком режиме

находится в интервале максимального проявления отпускной хрупкости (см. рис. 1).

Увеличение температуры отжига (режим 2) не приводит к изменению доли хрупкого межзеренного разрушения по сравнению с состоянием после облучения. Дальнейшее увеличение длительности выдержки с 30 до 100 ч (режим 3) вызывает снижение доли хрупкого межзеренного разрушения до 5 %, т.е. растворение образовавшихся в процессе эксплуатации сегрегаций.

Для проверки выбранного режима отжига были проведены фрактографические исследования отожженных и повторно ускоренно облученных образцов металла сварного шва 1-го блока Калининской АЭС, близкого по химическому составу сварного шва Балаковской АЭС (1,76 % Ni для Калининской АЭС и 1,88 % Ni для Балаковской АЭС). Результаты исследований приведены в табл. 5.

Повторное после восстановительного отжига ускоренное облучение образцов до флюенсов $28,5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ и $50,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$ не увеличивает уровень сегрегаций фосфора на границах зерен по сравнению с отожженным состоянием (доля хрупкого межзеренного разрушения в исследованных образцах остается на уровне 5 и 10 % для Балаковской и Калининской АЭС соответственно).

Таблица 5

Доля хрупкого межзеренного разрушения η в образцах металла сварного шва Калининской АЭС, блок 1 (средний размер зерна 100...150 мкм)

Состояние	$F, 10^{22} \text{ м}^{-2}$	Кал. АЭС-1 $\eta, \%$
Исходное	0	5
Облучение первичное	44,4	10
Отжиг по режиму 3	44,4	10
Повторное ускоренное облучение	28,8	10

Таким образом, вклад механизма образования зернограницных сегрегаций в повторное после восстановительного отжига радиационное охрупчивание исследованных сварных швов реакторов ВВЭР-1000 при ускоренных условиях облучения не столь значителен, однако стоит учитывать, что при эксплуатации реальных отожженных корпусов в течение 15...30 лет этот вклад может быть несколько выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 6 и на рис. 3 представлены результаты электронно-микроскопических исследований образцов металла сварных швов Балаковской АЭС, блок 1 и Калининской АЭС, блок 1.

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие особенности изменения наноструктуры материалов реакторов ВВЭР-1000 под действием первичного облучения, восстановительного отжига и повторного ускоренного облучения.

Облучение корпусных сталей реакторов ВВЭР-1000 приводит к образованию:

- радиационных дефектов в виде "черных точек" (дислокационных петель);
- округлых наноразмерных преципитатов размерами 3...5 нм, распределенных гомогенно в объеме зерен металла (см. рис. 3). По данным [1] эти преципитаты обогащены никелем, марганцем и кремнием в металле сварного шва и никелем и кремнием – в основном металле.

Основное отличие в эволюции наноструктуры материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 заключается в том, что в случае материалов ВВЭР-440 радиационно-индуцированные преципитаты обогащены медью и выделяются при со-

держании меди более 0,1%, т. е. под облучением происходит истощение матричного содержания меди и снижение плотности радиационно-индуцированных преципитатов при росте их средних размеров [6]. Для материалов реакторов ВВЭР-1000 радиационно-индуцированные преципитаты обогащены никелем и марганцем (легирующими элементами), и истощения их матричного содержания не происходит, что приводит к монотонному росту плотности радиационно-индуцированных преципитатов [8].

Таблица 6

Результаты электронно-микроскопических исследований СШ ВВЭР-1000

Состояние	$N_{\text{петель}}, 10^{21} \text{ м}^{-3}$	$\langle d \rangle_{\text{петель}}, \text{ нм}$	$N_{\text{прец}}, 10^{21} \text{ м}^{-3}$	$\langle d \rangle_{\text{прец}}, \text{ нм}$
Балаковская АЭС, блок 1				
Первичное облучение $F=34,4 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$	5...6	3...4	80...100	3...4
Отжиг по режиму 3	–	–	1...2	11...13
Повторное сверхускоренное облучение $F=50,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$	6...7	5...6	50...60	4...5
Повторное ускоренное облучение $F=28,5 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$	2...3	4...5	20...30	2...3
Калининская АЭС, блок 1				
Первичное облучение $F=24,0 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$	3...4	3...4	50...70	2...3
Отжиг по режиму 3	–	–	1...2	10...12
Повторное ускоренное облучение $F=28,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$	2...3	4...5	15...25	2...3
Первичное ускоренное облучение $F=28,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-2}$	2...3	4...5	40...50	2...3

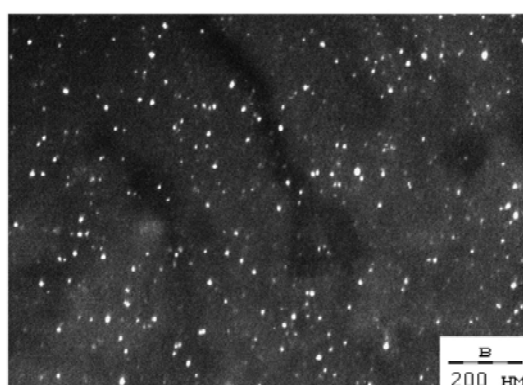
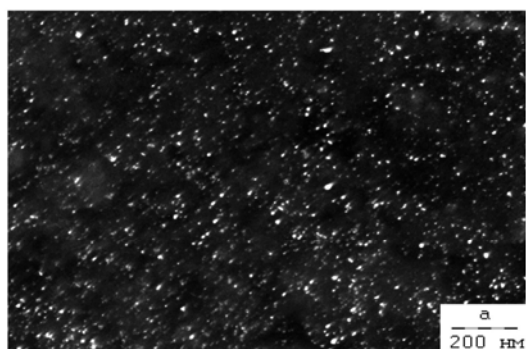


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения радиационно-индуцированных преципитатов в металле сварного шва реактора ВВЭР-1000 при первичном облучении (а), восстановительном отжиге (б), повторном ускоренном облучении (в)

Восстановительный отжиг приводит к практически полному исчезновению дислокационных петель и существенному растворению радиационно-индуцированных преципитатов (плотность данных преципитатов уменьшается примерно в 50 раз). Как следует из табл. 6, растворение одних преципитатов сопровождается некоторым ростом размеров других преципитатов, оставшихся нерастворенными.

Повторное после восстановительного отжига ускоренное облучение вновь приводит к появлению радиационно-индуцированных структурных составляющих: дислокационных петель и радиационно-индуцированных преципитатов. Однако при этом плотность образовавшихся преципитатов в 1,5–2 раза меньше, чем при первичном облучении при примерно равных значениях их размеров, а плотность вновь образовавшихся при повторном ускоренном облучении дислокационных петель оказалась выше, чем при первичном облучении, при несколько большем их размере. Увеличение плотности радиационных дефектов можно объяснить тем, что флюенс при повторном ускоренном облучении в 1,5 раза выше флюенса, достигнутого при первичном облучении.

Совокупное отличие размеров и плотностей радиационно-индуцированных элементов структуры при повторном после восстановительного отжига ускоренном облучении по сравнению с аналогичными параметрами после первичного облучения обуславливает более низкий темп радиационного охрупчивания исследованного сварного шва реактора ВВЭР-1000.

При этом, как отмечалось ранее, необходимо иметь в виду, что повторное облучение проводилось при плотности потока быстрых нейтронов, в ~400 раз превышающей плотность потока быстрых нейтронов при первичном облучении, что требует учета так называемого «эффекта флакса».

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные структурные исследования позволяют выбрать и обосновать режим восстановительного отжига корпусов с высоким (более 1,65%) содержанием никеля.

На рис. 4 показаны обобщенные результаты электронно-микроскопических исследований для материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000, полученные как для исследованных в данной работе сварных швов, так и для других швов, близких по содержанию никеля – элемента, наиболее значимым образом влияющего на радиационное охрупчивание корпусных сталей ВВЭР-1000, а также для основного металла [7].

Из рис. 4 видно:

- темп накопления радиационно-индуцированных преципитатов и радиационных дефектов в сварном шве гораздо выше, чем в основном металле, что и обуславливает существенно больший темп его охрупчивания;

- облучение с большей в 50...400 раз плотностью потока быстрых нейтронов (при большем флаксе) приводит к образованию преципитатов несколько меньшей плотности, чем в условиях облу-

чения в действующем реакторе, что свидетельствует о наличии «эффекта флакса»;

- темп накопления радиационно-индуцированных изменений структуры при повторном после отжига ускоренном облучении образцов металла сварного шва реактора ВВЭР-1000 ниже, чем при первичном облучении и определяет меньший темп повторного радиационного охрупчивания. Это позволяет рассчитывать на продление срока службы корпусов до 60 и более лет.

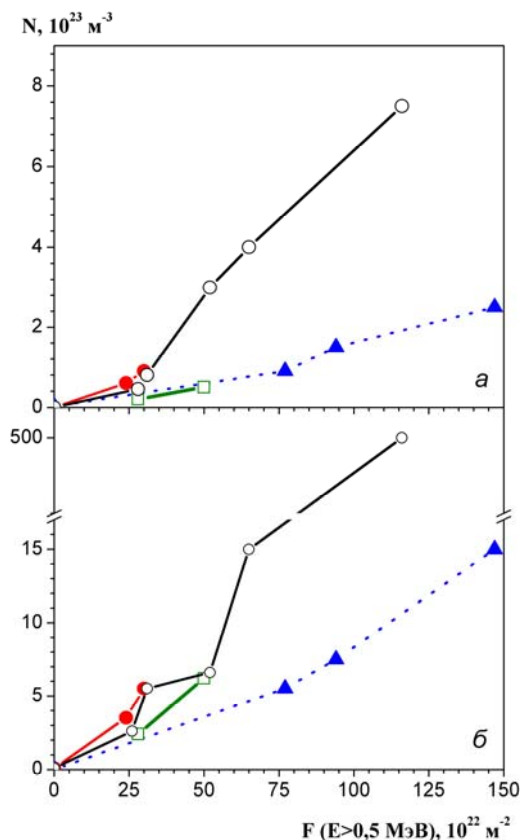


Рис. 4. Дозовая зависимость плотности радиационно-индуцированных преципитатов (а) и радиационных дефектов - дислокационных петель (б) для материалов реакторов ВВЭР-1000: ● – при первичном облучении металла сварного шва низкой плотностью потока быстрых нейтронов; ○ – при первичном облучении металла сварного шва высокой плотностью потока быстрых нейтронов; ▲ – при первичном облучении основного металла высокой плотностью потока быстрых нейтронов; ■ – при повторном после отжига облучении металла сварного шва высокой плотностью потока быстрых нейтронов

Сравнение результатов исследования тонкой структуры с результатами механических испытаний [7] (на примере сварного шва) позволяет сформулировать ряд общих закономерностей по влиянию характера радиационно-индуцированных структурных изменений материалов корпусов ВВЭР-1000 на их свойства после облучения, восстановительного отжига и повторного ускоренного облучения.

Отжиг по выбранному режиму обеспечивает достаточно полное восстановление структуры облученных сварных швов. При этом темп радиационно-

го охрупчивания сталей коррелирует с темпом накопления радиационно-индуцированных изменений структуры. Исчезновение дислокационных петель и резкое уменьшение плотности преципитатов в процессе восстановительного отжига приводит к почти полному восстановлению свойств сварного шва. Повторное ускоренное облучение вновь приводит к появлению радиационно-индуцированных наноразмерных структурных составляющих. Однако существенно меньшая суммарная плотность преципитатов и дислокационных петель, образовавшихся в процессе повторного облучения, по сравнению с первичным облучением и обусловила меньший темп повторного радиационного охрупчивания. Вероятно, неполное растворение радиационно-индуцированных преципитатов в процессе восстановительных отжигов и, как следствие, неполный возврат химического состава матрицы в исходное состояние привели к тому, что плотность радиационно-индуцированных преципитатов при повторном облучении, несмотря на 1,5 раза большую дозу облучения, оказалась существенно ниже и соответственно ниже темп повторного охрупчивания.

Таким образом, на основании структурных исследований и механических испытаний выбран и обоснован режим восстановительного отжига корпусов реакторов ВВЭР-1000 с повышенным содержанием никеля, обеспечивающий последующую эксплуатацию корпуса до суммарного ресурса более 60 лет. Показано:

- темп радиационного охрупчивания металла сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 выше, чем основных металлов;

- радиационное охрупчивание корпусных сталей обусловлено радиационным упрочнением в результате радиационно-индуцированных изменений их наноструктуры, а также образованием зернограницных сегрегаций фосфора;

- максимум температурного интервала проявления обратной отпускной хрупкости увеличивается по мере повышения содержания никеля в стали, что потребовало повышения температуры восстановительного отжига для сварных швов реакторов ВВЭР-1000 с повышенным содержанием никеля;

- выбранные температурно-временные параметры восстановительного отжига сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 с повышенным содержанием никеля обеспечивают достаточно полное восстановление структуры и свойств облученных материалов до уровня, необходимого для продления срока службы до 60 лет, а также минимизируют развитие сегрегационных процессов в материале;

- темп повторного после отжига охрупчивания при ускоренном облучении ниже, чем при первичном облучении;

- при повторном после восстановительного отжига ускоренном облучении обнаружено наличие «эффекта флакса».

Дальнейшие исследования необходимо направить на определение механических свойств антикоррозионной наплавки в процессе отжига и характеристик её охрупчивания при облучении после отжига; уточнение приемлемых допусков по температуре и скоростям охлаждения, проведение оценки и прогноз по сопротивлению хрупкому разрушению основного металла в зонах корпуса реактора, подверженных температурам, близким к интервалу отпускной хрупкости; уточнение расчетной схемы распределения температур по сечениям корпуса реактора, а также на расчет внутренних напряжений в корпусе реактора, которые могут возникнуть в процессе проведения восстановительного отжига, в том числе в антикоррозионной наплавке.

Работа выполнена в рамках лота ФЦП Федерального агентства по науке и инновациям, государственный контракт 02.523.12.3012.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.K. Miller, A.A. Chernobaeva, Y.I. Shtrombakh et al. Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing // *J. Nucl. Mat.* 2009, v.385, p. 615–622.
2. Yu.A. Nikolaev. Radiation embrittlement of Cr-Ni-Mo and Cr-Mo RPV steels // *J. of ASTM Intern.* 2007, v. 4, № 8, p. 1–17.
3. С.А. Салтыков. *Стереометрическая металлография*. М.: «Металлургия», 1976, 271 с.
4. P.M. Kelly, A. Jostsons, R.G. Blake, J.G. Napier. The determination of foil thickness by scanning transmission electron microscopy // *Phys. Status Solidi (A)*. 1975, v.31, p.771.
5. Л.М. Утевский, Е.Е. Гликман, Г.С. Карк. *Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа*. М.: «Металлургия», 1985, 271 с.
6. Г.С. Карк, А.А. Астафьев. Отпускная хрупкость низколегированных Cr-Ni-Mo-сталей // *Труды ЦНИИТМАШ*. М., 1983, №177.
7. Я.И. Штромах, Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова и др. Исследование влияния отжига облученных материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000, обеспечивающего восстановление их микроструктуры и свойств до уровня, необходимого для продления срока службы до 60 лет // *Proceedings of the eleventh international conference on material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment 14-18 June 2010, St. Petersburg, Russia*, v. 1, p.46-55.
8. Е.А. Kuleshova, B.A. Gurovich, Ya.I. Shtrombakh, et al. Microstructural behavior of VVER-440 reactor pressure vessel steels under irradiation to neutron fluences beyond the design irradiation period. // *J. Nucl. Mater.* 2005, v. 342, № 1-3, p. 77–89.

Статья поступила в редакцию 30.08.2010 г.

СТРУКТУРНІ КРИТЕРІЇ ВИБОРУ РЕЖИМА ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ВІДПАЛУ МАТЕРІАЛІВ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000

Б.А. Гурович, Я.І. Штромбах, Є.А. Кулешова, С.В. Федотова

На підставі структурних критеріїв вибраний і обґрунтований режим відновлювального відпалу зварювальних швів корпусів реакторів ВВЕР-1000 з підвищеним вмістом нікелю (більше 1,65%), що забезпечує продовження терміну служби проблемних корпусів до 60 і більше років.

STRUCTURAL CRITERIA OF RECOVERY ANNEALING REGIME SELECTION FOR VVER-1000 REACTOR PRESSURE VESSEL MATERIALS

B.A. Gurovich, Ya.I. Shtrombakch, E.A. Kuleshova, S.V. Fedotova

In this paper on the strength of structural criteria the recovery annealing regime for VVER-1000 welds with high nickel content (more than 1,65%) which provides lifetime extension for 60 years and more had been selected and validated.