

ПЛАСТИНА МЕТАЛЛА JRQ КАК МОДЕЛЬ СТЕНКИ КОРПУСА РЕАКТОРА

*М. Брумовский¹, В.Н. Голованов², В.М. Раецкий²,
М. Китка¹, Д.В. Козлов², Г.В. Шевляков²*

¹*ИЯИ, Ржеж, Республика Чехия; E-mail bru@ujv.cz;*

²*ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия;
E-mail: adm@niiar.ru*

Результаты испытания облученных образцов металла JRQ показывают, что слой металла, в котором достигается наибольшее значение критической температуры хрупкости T_{kf} , находится в середине «стенки корпуса реактора». Для «однородного металла JRQ», взятого из внутренней части плиты, наибольшее значение T_{kf} достигается на «внутренней поверхности корпуса реактора». Ослабление радиационного повреждения металла JRQ на «толщине стенки корпуса реактора» зависит от исходного состояния металла: для внешних слоев ослабление равно $\sim 65^\circ\text{C}$, для внутренних слоев $\sim 42^\circ\text{C}$. Ранжирование моделей изменения T_{kf} и поглощенной энергии верхнего шельфа возможно в интервалах флюенса нейтронов ($E > 1$ МэВ) $< 0,3 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$ и $> 4 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$. Результаты показывают важность учета состояния металла, ослабления потока и изменения энергетического спектра реакторных излучений на толщине корпуса реактора при проведении аттестационных экспериментов и уточнении времени эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР.

ВВЕДЕНИЕ

На базе разработок [1-3] в рамках проекта «Ослабление радиационного повреждения в корпусах реакторов типа ВВЭР» («Attenuation»), предложенного NRI, Rez, Czech Republic, изучено ослабление радиационного охрупчивания малолегированных ферритоперлитных корпусных сталей в результате ослабления потока и изменения энергетического спектра реакторных излучений на толщине металла 180...190 мм, соответствующей толщине стенки корпуса реактора [4]. Технология формирования условий облучения на блоке образцов моделировала технологию формирования условий облучения корпуса ВВЭР, а также изменение плотности потока и энергетического спектра реакторных излучений на толщине блока образцов, равной толщине корпуса реактора.

Целью работы является представление предварительных результатов по ослаблению радиационного охрупчивания металла JRQ на толщине, равной толщине корпуса реактора типа ВВЭР-1000.

1. МЕТАЛЛ

Сталь JRQ (аналог американской корпусной стали А-533В) была выбрана для исследования радиационного охрупчивания как материал, исследованный в рамках IAEA Coordinated Research Program, Phase III [5,6], CRP-3. В базе данных положение образцов характеризуется расстоянием от «ближайшей» первоначальной поверхности, названным «глубиной» [6].

Первый массив образцов (J-массив) состоял из 13 малых серий образцов (9 образцов в серии), вырезанных из 13-ти слоев, располагавшихся на разном расстоянии от «ближайшей» первоначальной поверхности (с разной глубины). При облучении

слоев образцов в ампуле сохранено относительное положение слоев в пластине.

Второй массив образцов (R-массив) состоял из 12-ти малых серий образцов (8-9 образцов в серии), вырезанных из одного-трех внутренних слоев пластины. Образцы типа R были установлены между слоями других образцов с целью представительного сравнения условий облучения по эталонному металлу. Другой целью было определение эффектов интенсивности и энергетического спектра реакторных излучений на «однородном», хорошо изученном, реагирующем на изменения условий облучения металле.

2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

Ударные испытания проводились на установке RKP-450, оснащенной системой автоматического термостатирования и подачи образца. Испытания всех образцов проводились в режиме «инструментованное испытание» с записью диаграмм нагрузки и перемещения по времени. Температурная зависимость поглощенной энергии $KV(T)$ аппроксимировалась для каждого слоя функцией вида [7]

$$KV(T) = A + B \cdot (th((T - T_0)/C)), \quad (1)$$

где T – температура испытания; T_0 – температура середины области перехода металла из хрупкого в вязкое состояние; параметры характеризуют C – ширину переходной области, A и B – поглощенную энергию на уровне нижнего и верхнего шельфа. Процедура подбора значений A , B , T_0 , C по экспериментальным значениям поглощенной энергии определена нормативными требованиями. Критическая температура хрупкости определялась из соотношения

$$T_{kf} = T_0 + C \cdot \text{arctg}((KV(T_{kf}) - A)/B) \quad (2)$$

по критериальным значениям $KV(T_{KF})=40$ Дж ($KCV(T_{KF})=50$ Дж/см²), соответствующим пределу текучести 460...549 МПа.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ [4]

Среднее значение температуры облучения блока образцов равно 285⁰С. Средние значения температуры слоев образцов находятся в интервале 280<T<290 °С. Значения флюенса нейтронов с энергией $E \geq 0,5$ МэВ на толщине блока образцов изменялись от $(6,7...7,7) \cdot 10^{19}$ см⁻² на первых слоях до $(0,47...0,54) \cdot 10^{19}$ см⁻² на 18-х слоях образцов. Значения получены по результатам измерения флюенса нейтронов ($E > 3,0$ МэВ) в измерительных каналах ампул и ранее установленной зависимости плотности потока нейтронов от глубины слоя образцов.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ JRQ В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ

Результаты по поглощенной энергии для 13-ти слоев [11] интерполированы по соотношению (1) для определения параметров А, В, То, С. Изменение параметра То в 6-7 раз превышает стандартное отклонение, а параметров А, В, С – не превышает двух стандартных отклонений. Изменение критической температуры хрупкости TKV_{40J} и TKV_{68J} , поглощенной энергии на верхнем $KV_{вш}=A+B$ и нижнем $KV_{нш}$ шельфе, показано на рис. 1.

Точки, отклонение которых от линии превышает одно-два стандартных отклонения, выделены большим размером.

Значения TKV_{40J} для внутренней трети толщины плиты не отличаются от значений работ [12,13 и 14] (см. рис. 1).

Распределение TKV_{40J} , TKV_{68J} и параметра То описывается соотношением вида

$$TKV_{40J} = TKV^* + a_1 \cdot (x-x^*)^n, \quad (3)$$

где TKV^* – значение критической температуры хрупкости на глубине x^* ; a_1 и n – эмпирические коэффициенты; $n=2$. Рассеяние значений $\pm 13^0$ С больше, чем рассеяние значений из базы данных [5, 6]. Выбросов нет. Возможно, в центральных слоях плиты значения TKV постоянны и равны -21^0 С. Распределение TKV_{68J} в среднем смещено на $(17,3 \pm 2,5)^0$ С относительно распределения TKV_{40J} . Для внутренней трети толщины плиты значения TKV_{68J} не отличаются от значения работы [8].

Распределение TKV подобно распределению температуры по толщине пластины при охлаждении ее в жидкости. Распределение температуры оценено по режиму термообработки, приведенному в работе [8], с использованием результатов работ [9, 10].

Режимы охлаждения поверхности и центра плиты различаются:

- временем прохождения области превращения $\gamma \leftrightarrow \alpha$; время остывания от 723 до 300 °С практически одинаково;
- напряженным состоянием: поверхностный слой растянут, центральный – сжат.

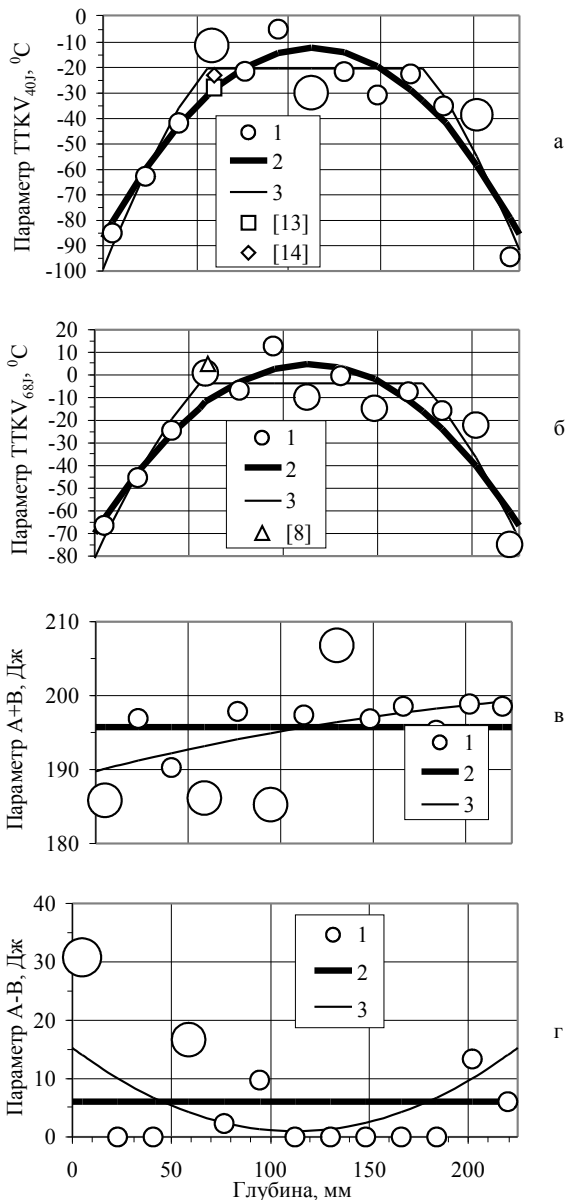


Рис. 1. Изменение характеристик необлученного металла JRQ:

а и б – критическая температура хрупкости TKV_{40J} и TKV_{68J} ; в и г – поглощенная энергия на верхнем и нижнем шельфе;

1 – значения характеристик для слоя, определенные по значениям поглощенной энергии [11], 2 и 3 – интерполирование основное и сложное, [8], [13], [14] – значения из работ [8, 12, 13, 14]

От поверхностного к центральному слою металла плиты увеличивается время прохождения области превращения $\gamma \leftrightarrow \alpha$, изменяется напряженное состояние. Упругие напряжения распределены по соотно-

шению, подобному соотношению (3) при $n=2$ [9, 10]. Внутренние области плиты $-h/\sqrt{3} < x < h/\sqrt{3}$ сжаты (толщина плиты $2h$), а внешние – растянуты. Оба фактора определяют изменение структурного состояния металла в слоях в процессе закалки, отпуска и отжига.

Одной из характеристик результатов испытания является рассеяние значений поглощенной энергии относительно нормативной линии интерполирования. При повышении температуры испытания отклонение $(KV_3 - KV_n)$, Дж и $(KV_3 - KV_n)/KV_n$, отн. ед., экспериментальных значений KV_3 от интерполированных KV_n достигает максимума при $T=T_0$ (рис. 2). Изменение рассеяния является следствием перехода разрушения от хрупкого к вязкому.

Большая часть отклонений попадает в область погрешности определения поглощенной энергии ± 5 Дж и температуры испытания ± 5 °С. В области верхнего шельфа отклонения находятся в интервале от -10 до 10 Дж, $\pm 5\%$, что соответствует рекомендациям ASTM.

Экспериментальные значения энергии разрушения 208 образцов Шарпи из 13-ти слоев пластины металла JRQ в исходном состоянии были интерполированы соотношением, подобным соотношению (1):

$$ТТКV(T, x) = A(x) + B(x) \cdot \text{th}((T - T_0(x))/C(x)), \quad (4)$$

где x – глубина слоя (надреза); $A(x) = A + a \cdot (x - x_0)^2$; $B(x) = B + b \cdot (x - x_0)^2$; $T_0(x) = T_0 + t \cdot (x - x_0)^2$; $C(x) = C + c \cdot (x - x_0)^2$. Важна точность указания расстояния от поверхности плиты.

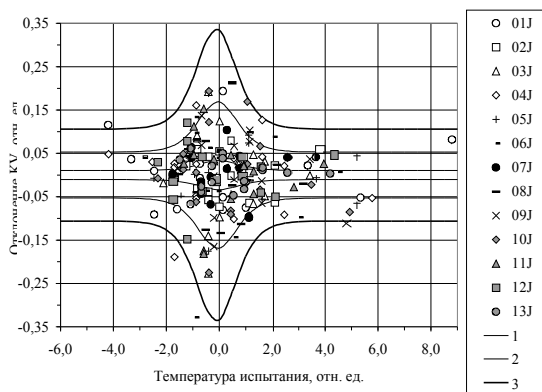


Рис. 2. Рассеяние экспериментальных значений поглощенной энергии $(KV - KV_n)/2B$ в интервале значений температуры испытания $(T - T_0)/C$ образцов Шарпи стали JRQ в исходном состоянии: точки – отклонение экспериментальных значений от линии интерполирования для соответствующего слоя образцов. Линии – отклонение от линии интерполирования для слоя при погрешности определения поглощенной энергии, Дж и температуры испытания, °С: 1 – ± 1 Дж и 1 °С; 2 – ± 5 Дж и 5 °С; 3 – ± 10 Дж и 10 °С

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ JRQ

Для испытаний была выбрана часть слоев образцов, по результатам которых можно было бы получить предварительные оценки по ослаблению радиационного охрупчивания на толщине пластины металла JRQ – модели реального (J-массив) и «однородного» (R-массив) металла корпуса реактора. Значительная часть образцов оставлена для сличительных испытаний, NRI, Республика Чехия, Ржеж.

J-массив. Критическая температура хрупкости слоя $T_{KF} = TTKV_{сл}$ для J-массива (рис. 3) изменяется на толщине блока образцов от -40 до 77 °С. Наибольшее значение достигается в 9-м слое ампулы (флюенс нейтронов $(E > 0,5 \text{ МэВ}) \cdot 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, температура облучения 287 °С).

Критическим с точки зрения эксплуатационного ресурса является охрупчивание внутренних слоев пластины. Более сильное охрупчивание внутренних слоев металла было смоделировано в работе [5].

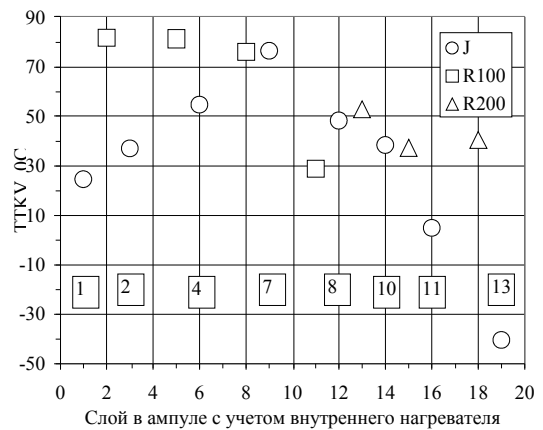


Рис. 3. Критическая температура хрупкости по образцам, облученным на разном удалении от переднего блока нагревателей. Образцы из слоев, представляющих: J – реальный металл на полной толщине пластины; R100 и R200 – среднюю часть пластины; 1, 2, 4, ..., 11, 13 – номера слоев J-массива образцов

Можно предполагать, что исходное состояние металла JRQ в первом и последнем слоях пластины отличается незначительно и характеризуется приблизительно равными значениями $ТТКV_{сл}$. Тогда разность соответствующих значений для облученного металла 65 °С является оценкой изменения $ТТКV_{сл}$ в результате изменения плотности потока и энергетического спектра реакторных излучений на толщине стенки корпуса реактора.

R-массив. На R-массиве, представляющем «однородный» металл средней (по толщине) части пластины, критическая температура хрупкости $ТТКV_{сл}$ изменяется от (40 ± 12) до 82 °С (см. рис. 3).

В случае «однородного» металла эксплуатационный ресурс определяется радиационным охрупчиванием слоев металла, расположенных ближе к активной зоне реактора (флюенс нейтронов ($E > 0,5$ МэВ) $6 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$, температура облучения $286 \text{ }^\circ\text{C}$). Разность значений $\text{ТТКВ}_{\text{сл}}$ $42 \text{ }^\circ\text{C}$ для облученного металла R-массива является оценкой изменения критической температуры хрупкости в результате изменения плотности потока и энергетического спектра реакторных излучений на толщине стенки корпуса реактора.

Разность изменений $\text{ТТКВ}_{\text{сл}}$ на J-массиве образцов $65 \text{ }^\circ\text{C}$ и на R-массиве массиве $42 \text{ }^\circ\text{C}$ является оценкой изменения критической температуры хрупкости в результате изменения исходного структурного состояния на толщине пластины.

6. ЗАВИСИМОСТЬ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ СТАЛИ JRQ ОТ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ

Изменения ΔT_{KF} (рис. 4), вызванные облучением, превышают изменения, вызванные термомеханической обработкой металла.

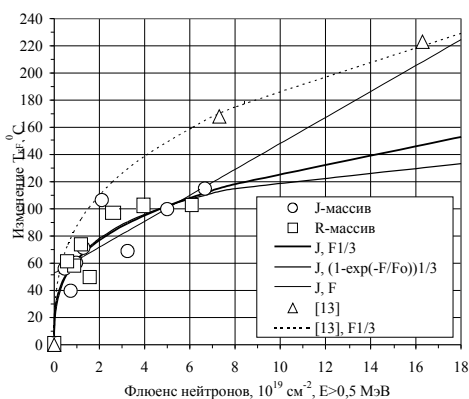


Рис. 4. Изменение критической температуры хрупкости T_{KF} , соотнесенное с флюенсом нейтронов $E > 0,5$ МэВ: J-массив и R-массив; интерполирование по нормативной $J, F/1/3$, экспоненциальной $J, (1-\exp(-F/F_0))/1/3$ и линейной зависимости J, F . [13] – $F, \text{Oszvald}$ [13]; [13], $F/1/3$ – интерполированные результаты [13] по нормативной зависимости

Значения критической температуры хрупкости для J-массива интерполированы по нормативному, экспоненциальному и линейному соотношениям. В области эксперимента соотношения

$$\Delta T = \Delta T^* + A_F (F/F_0)^{1/3},$$

$$\Delta T = \Delta T^* + A_F (1 - \exp(-F/F^*_0))^{1/3}$$

и

$$\Delta T = \Delta T^* + a \cdot (F/F_0) \quad (5)$$

различаются незначительно. Выбор соотношения может быть сделан при получении результатов на образцах, облученных в интервале значений флюенса ($E > 0,5$ МэВ) $> 8 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$ и $< 0,4 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$.

Большие изменения $\text{ТТКВ}_{40\mu}$ в работе [13] (см. рис. 4) могут быть обусловлены более низкой температурой облучения.

Экспериментальные результаты сопоставлены также с результатами работы [14] (рис. 5). Наибольшее различие наблюдается при флюенсе нейтронов $1,5 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$. В интервале условий эксперимента результаты интерполирования различаются незначительно. Информативными являются интервалы флюенсов $< 0,3 \cdot 10^{19}$ и $> 4 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$.

Результаты могут быть описаны соотношением, представляющим два процесса радиационного охрупчивания:

$$\Delta T = \Delta T^* + A_{F1} (1 - \exp(-F/F^*_{01}))^{1/3} + A_{F2} (1 - \exp(-F/F^*_{02}))^{1/3} \quad (6)$$

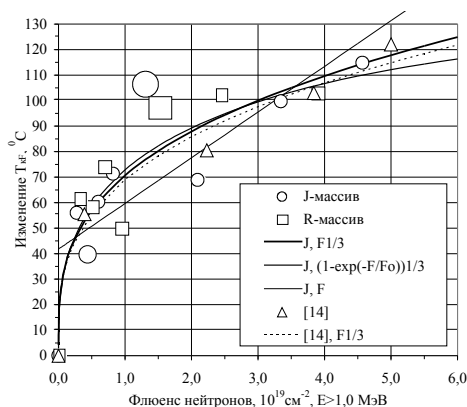


Рис. 5. Изменение критической температуры хрупкости, соотнесенное с флюенсом нейтронов с энергией $E > 1,0$ МэВ: J-массив и R-массив; интерполирование по нормативной $J, F/1/3$, экспоненциальной $J, (1-\exp(-F/F_0))/1/3$ и линейной зависимости J, F . [14] – результаты работы [14]; $F/1/3$ – интерполирование по нормативной зависимости результатов [14]

Первый процесс определяется [15] закреплением дислокаций примесями (фосфор, углерод) и «ареалом» простых радиационных дефектов при возмущении кристаллической решетки смещенными атомами (эффективный флюенс нейтронов $0,5 \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$), второй процесс – накоплением сложных радиационных дефектов, скоплениями, сегрегациями и т.п. (эффективный флюенс нейтронов $(6 \dots 10) \cdot 10^{19} \text{см}^{-2}$).

7. ИЗМЕНЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ СТАЛИ JRQ НА ВЕРХНЕМ ШЕЛЬФЕ

Изменение поглощенной энергии на уровне верхнего шельфа в результате облучения (рис. 6) значительно превышает изменение энергии разрушения, вызванное термомеханической обработкой. Значения для J-массива и R-массива ложатся на общую линию.

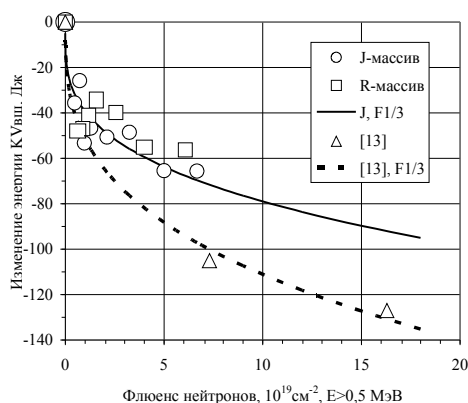


Рис. 6. Уменьшение поглощенной энергии на верхнем шельфе: J-массив и R-массив; J, F1/3 – интерполирование по нормативной зависимости; [13] – результаты работы [13]; [13], F1/3 – интерполирование результатов [13] по нормативной зависимости

В отличие от термомеханической обработки (рис. 7, J-массив, исх.) при облучении в стенде КОРПУС уменьшение энергии верхнего шельфа по абсолютной величине пропорционально увеличению критической температуры хрупкости (см. рис. 7, J-массив и R-массив).

Результаты работы [14] показывают существование инкубационного периода, в течение которого поглощенная энергия верхнего шельфа остается постоянной, тогда как критическая температура хрупкости увеличивается. Результаты работы [13] не содержат значений $KV_{вн}$ и $ТТК_{40}$ при малых флюенсах нейтронов. Они могут быть отнесены и к той, и к другой зависимости.

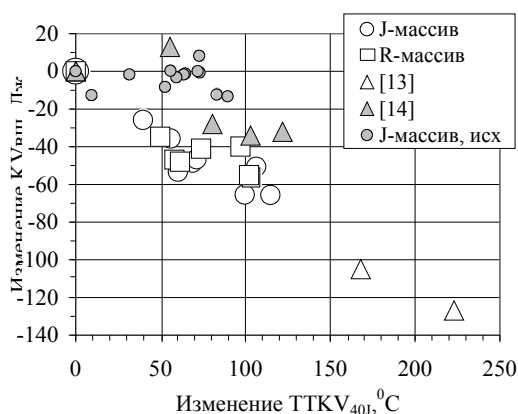


Рис. 7. Сопоставление изменения верхнего шельфа и критической температуры хрупкости: J-массив и R-массив – после облучения; J-массив, исх. – до облучения; [13] – результаты работы [13]; [14] – результаты работы [14]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные результаты испытания облученных образцов металла JRQ показывают, что слой металла, в котором достигается наибольшее значение критической температуры хрупкости, находится в середине «стенки корпуса реактора». Это является следствием высокой неоднородности металла плиты

в исходном состоянии. Для «однородного металла JRQ», взятого из внутренней части плиты, наибольшее значение критической температуры хрупкости достигается на «внутренней поверхности корпуса реактора».

Ослабление радиационного повреждения металла JRQ на «толщине стенки корпуса реактора» зависит от исходного состояния металла: для внешних слоев ослабление равно ~ 65 °С, для внутренних слоев ~ 42 °С. Эффект структурного состояния металла равен 23 °С.

Ранжирование моделей изменения критической температуры хрупкости и поглощенной энергии верхнего шельфа возможно в интервалах флюенса нейтронов ($E > 1$ МэВ) $< 0,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и $> 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Полученные результаты показывают важность учета состояния металла, ослабления потока и изменения энергетического спектра реакторных излучений на толщине корпуса реактора при проведении (аттестационных) экспериментов в разных облучательных устройствах и уточнении времени эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Цыканов, В.М. Раецкий, В.Н. Голованов и др. Моделирование радиационного охрупчивания металла корпуса реактора ВВЭР-1000 на стенде КОРПУС реактора РБТ-6 // Сб. докладов XII Ежегодной конференции Ядерного общества России «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии». Димитровград: ГНЦ НИИ-АР, 2002, т. 3, ч. 2, с. 167–187.
2. V.N. Golovanov, D.V. Kozlov, V.I. Prokhorov, V.M. Raetsky, V.K. Shamardin, V.A. Krasnoselov, J.P. Massoud, C. Trollar, R. Bertrand (EdF). Comparison of the Russian and French normative determination techniques of radiation embrittlement of pressurized water reactor vessels // *Proceeding*, v. 2, p. 715-729.
3. В.Н. Голованов, В.М. Раецкий. Эксперимент по уточнению кинетики радиационного охрупчивания металла на толщине корпуса реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-150 для уточнения степени консерватизма проектных решений // *Тез. докл. на IV Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 23-26 мая 2005 г.* Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2005, с. 121.
4. Milan Brumovský, V.N. Golovanov, V.V. Lichadeev, V.M. Raetsky, A.L. Petelin, V.N. Lyssakov. Attenuation of radiation damage and neutron field in RPV wall // *IAEA Specialists' Meeting On Radiation Damage*. Gus Khrustalny, May 24-27, 2004.
5. F. Gillemot, F. Oszwald, L. Gillemot, G. Uri, S. Pirfo: Synergetic Effects of Irradiation and Thermal Embrittlement // *Irradiation Effects and Mitigation, Proceedings of the IAEA Specialists Meeting held in Vladimir, Russian Federation, 15-19 September 1997*. IAEA, Vienna, Austria, p. 23-229.

6. L.E. Steele, M. Brumovsky, F. Gillemot, A. Kryukov, K. Wallin. *Phase III of the IAEA Coordinated Reserch Program on Optimizing of Reactor Pressure Vessel Surveillance Programs and Their Analysis. ASTM USA. 25 Jun 1996.*
7. *Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86.* М.: «Энергоатомиздат», 1989.
8. Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, О.В. Лавренюк. Сравнение особенностей разрушения американских и российских корпусных сталей после ударных испытаний // *Сборник докладов IV Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению.* Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996, т. 3, с. 6–21.
9. Г. Карлсру, Д. Егер. *Теплопроводность твердых тел.* М.: «Наука», 1964.
10. Б. Боли, Дж. Уэйнер. *Теория температурных напряжений.* М.: «Мир», 1964.
11. Milan Brumovsky, Milos Kytka, Milan Marek, P. Novosad, V.N. Golovanov, V.V. Lichadeev, V.M. Raetsky, A.L. Petelin, V.N. Lyssakov. Attenuation of radiation damage and neutron field in RPV wall // *The Proceedings of the International Workshop «Influence of Atomic Displacement Rate on Radiation-Induced Ageing of Power Reactor Components: Experiment and Modeling».* 3-7 October 2005, Ulyanovsk.
12. F. Oszvald, F. Gillemot, L. Toth. Preliminary results of surveillance extension program of Paks NPP. Presented on the IAEA Specialist Meeting on “Irradiation Embrittlement and Mitigation” // *Espoo, Finland, Oct. 23-26, 1995.*
13. F. Oszvald. Research Results from WWER-440 Irradiation Effects and Mitigation // *Proceedings of the IAEA Meeting held in Vladimir, Russian Federation 15 - 19 September 1997. Redroduced by the IAEA, Viena, Austria. 1997, p. 263–272.*
14. R.K. Nanstad, Ph. Tipping, W. Waeber, and R.D. Kalkhof: Effects of Irradiation and Post-Annealing Reirradiation on Reactor Pressure Vessel Steel Heat JRQ // *IAEA Specialists Meeting on Irradiation Embrittlement and Mitigation, Gloucester, England, UK. 14-17 May 2001.*
15. В.М. Раецкий. О кинетике изменения температуры хрупкости и режиме испытаний корпусных материалов ВВЭР // *Тезисы докладов V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению.* Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР. 1997, с. 72–73.

ПЛАСТИНА МЕТАЛУ JRQ ЯК МОДЕЛЬ СТІНКИ КОРПУСА РЕАКТОРА

М. Брумівський, В.М. Голованов, В.М. Раєцький, М. Кітка, Д.В. Козлов, Г.В. Шевляков

Результати випробування опромінених зразків металу JRQ показують, що шар металу, у якому досягається найбільше значення критичної температури крихкості T_K , перебуває в середині «стінки корпусу реактора». Для «однорідного металу JRQ», взятого із внутрішньої частини плити, найбільше значення T_K досягається на «внутрішній поверхні корпусу реактора». Ослаблення радіаційного ушкодження металу JRQ на «товщині стінки корпусу реактора» залежить від вихідного стану металу: для зовнішніх шарів ослаблення дорівнює 65°C , для внутрішніх шарів 42°C . Ранжирування моделей зміни T_K і поглиненої енергії верхнього шельфу можливо в інтервалах флюенса нейтронів ($E > 1$ Мев) $< 0,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ і $> 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Результати показують важливість обліку стану металу, ослаблення потоку й зміни енергетичного спектра реакторних випромінювань на товщині корпусу реактора при проведенні атестаційних експериментів і уточненні часу експлуатації корпусів реакторів ВВЕР.

JRQ STEEL PLATE AS A REACTOR VESSEL WALL DUMMY

M. Brumovsky, V.N. Golovanov, V.M. Raetsky, M. Kytka, D.V. Kozlov, G.V. Shevlyakov

Results of testing of the irradiated JRQ steel specimens show that a steel layer, where the highest critical embrittlement temperature T_{KF} is achieved, is located in the middle of the “reactor vessel wall”. As for the “homogeneous JRQ steel” taken from the inner part of the plate the highest T_{KF} value is achieved on the “inner surface of the reactor vessel”. Reduction of radiation damage of the JRQ steel through out the wall of the reactor vessel depends on the initial steel condition: reduction for the outer and inner layers makes up respectively $\sim 65^\circ\text{C}$ and $\sim 42^\circ\text{C}$. It is possible to range change of T_{KF} and absorbed energy of the upper shelf within the neutron fluence ($E > 1$ MeV) $< 0,3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ and $> 4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Results show that it is important to take into account the steel state, flow attenuation and change of the reactor emission energy spectrum through out the wall of the reactor vessel during certification experiments and for specification of lifetime of the WWER vessels.