

О ВЛИЯНИИ ЛЕГИРУЮЩИХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАДИАЦИОННОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ НИКЕЛЬ СОДЕРЖАЩИХ КОРПУСНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

*А.М. Морозов, В.А. Николаев, Е.В. Юрченко
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия*

Приводятся результаты экспериментального исследования Cr-Ni-Mo-V стали и металла ее сварных швов промышленного производства с содержанием никеля от 1.0 до 1.8%Ni, проводившегося в различных исследовательских (ВВР-М, РБТ-10) и энергетических (ВВЭР-1000, РБМК) реакторах при плотности потока быстрых нейтронов $10^{16}\sim 10^{17}$ н/м²·с и температуре облучения ~290°С. По итогам эксперимента выполнен математико-статистический анализ зависимости радиационно-индуцированного сдвига температуры вязко хрупкого перехода ΔT_k от величины флюенса быстрых нейтронов в интервале $10^{22}\dots 3\cdot 10^{24}$ н/м² и от содержания легирующих и примесных элементов, реально или потенциально способных оказывать влияние на чувствительность материала к облучению (Ni, Mn, P, Cu, Si, S). Из-за узких пределов вариации содержания всех этих элементов, за исключением никеля (ввиду соответствующих ограничений по ТУ), выявлено влияние только последнего. Получено эмпирическое соотношение, описывающее дозовую зависимость ΔT_k степенной функцией с существенно отличающимся от нормативного показателем степени $n=0.7$ и учитывающее влияние концентрации никеля при ее изменении в пределах 1.0...1.8%. Продемонстрирована достаточная консервативность полученной формулы по отношению к опубликованным результатам испытаний образцов-свидетелей материала корпусов реакторов ВВЭР-1000, облучавшихся при плотности потока нейтронов порядка 10^{15} н/м²·с. Произведена оценка возможности использования соотношения для прогноза охрупчивания стали с содержанием никеля <1.0%.

ВВЕДЕНИЕ

В целом ряде отечественных [1-7] и зарубежных [8-12] работ было изучено раздельное влияние легирующих и примесных элементов на радиационное охрупчивание ферито-перлитной стали и металла ее сварных швов. Обобщение этих исследований представлено авторами [13]. На современном этапе исследований поведения корпусных материалов в процессе эксплуатации атомных реакторов стоит задача получения обобщенной зависимости радиационного охрупчивания от величины флюенса нейтронов с учетом химического состава (легирующих элементов и примесей) металла корпусов ВВЭР действующих АЭС. Этот вопрос наиболее актуален применительно к корпусам ВВЭР-1000, поскольку, как это уже неоднократно отмечалось [13-15], нормативная [16] зависимость радиационного охрупчивания материалов ВВЭР-1000 дает неадекватный прогноз деградации свойств при изменении величины флюенса даже в пределах проектных его значений, особенно для металла сварных швов с повышенным (до ~1.9%) содержанием никеля.

В настоящей работе предпринята попытка на основе математико-статистического анализа радиационного охрупчивания материалов найти соотношения для описания дозовой зависимости радиационного охрупчивания промышленных материалов – основного металла стали 15Х2НМФА-А и металла ее сварных швов с учетом влияния легирующих элементов и примесей.

1. ИССЛЕДОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Подборка исследованных материалов включает в себя 7 проб промышленной стали 15Х2НМФА-А, 15ХЗНМФА-А и ВК-2М, а также 15 сварных проб.

Для данной работы были взяты материалы, изготовленные на Ижорском заводе, а также на Волгоградском заводе «Баррикады» и на заводе «Атоммаш». Различия колебания никеля в основном металле невелико – его содержание находится в пределах от 0.96 до 1.18%. Содержание фосфора составило 0.005...0.012%, меди 0.03...0.08%, марганца 0.41...0.50%, т.е. различия концентрации перечисленных элементов находится в довольно узком диапазоне, так же, как и различия концентраций остальных элементов. Исключение составляют плавки завода «Баррикады», где концентрация Мо находится в диапазоне 0.62...0.90%.

В отличие от основного металла, для металла сварных швов следует выделить две группы, существенно отличающихся друг от друга по содержанию никеля. Первая – с концентрацией никеля 1.1...1.36%, вторая – с концентрацией его 1.65...1.8%. Первая группа швов изготовлена с использованием проволоки марки Св-08ХГНМТА и Св-09ХГНМТА-ВИ и флюса марок 48НФ-18М, 48КФ-30. Для второй группы швов была использована проволока марок Св-10ХГНМА-А и Св-12Х2Н2МА-А и флюс ФЦ-16 (шов 200-1А был изготовлен с использованием флюса 48НФ-18М). Содержание фосфора и меди в металле швов находилось в пределах 0.007...0.015 и 0.02...0.07% соответственно, что является довольно типичным для сварных швов реакторов ВВЭР-1000. В отношении других элементов можно отметить, что их содержание в швах находится также в довольно узком диапазоне концентраций.

Некоторые сварные швы являются материалом производственных контрольных проб к сварным швам следующих реакторов: 260-5 – 2 блок Запорожской АЭС; 550-8А – 2 блок Калининской АЭС; 530 -32 и 530-А6 – 1 блок Калининской АЭС; 260-11 – 2 блок Балаковской АЭС.

Основная часть образцов исследованных материалов была облучена в реакторе ВВР-М ПИЯФ РАН (г. Гатчина) при плотности потока нейтронов $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ н/м}^2 \cdot \text{с}$. Часть образцов облучалась в 5 блоке Нововоронежской АЭС (реактор ВВЭР-1000) по исследовательской программе при плотности потока нейтронов с энергией $E > 0.5 \text{ МэВ}$ в пределах от $1 \cdot 10^{16}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ н/м}^2 \cdot \text{с}$. Некоторое количество образцов было облучено также в канале реактора РБМК Ленинградской АЭС и в исследовательском реакторе РБТ-10 при плотности потока нейтронов $5 \cdot 10^{16}$ и $\sim (3.7 \dots 5.0) \cdot 10^{17} \text{ н/м}^2 \cdot \text{с}$ соответственно. Облучение во всех случаях проводилось при температуре облучения $285 \pm 10^\circ \text{C}$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для определения влияния химического состава и дозовой зависимости радиационного охрупчивания была проведена математико-статистическая обработка накопленных экспериментальных данных. Первоначально была использована мультипликативная модель вида:

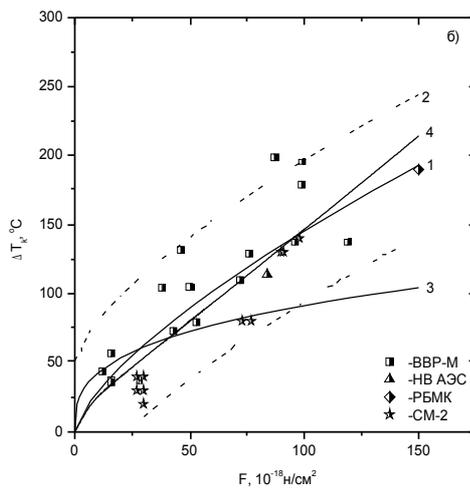
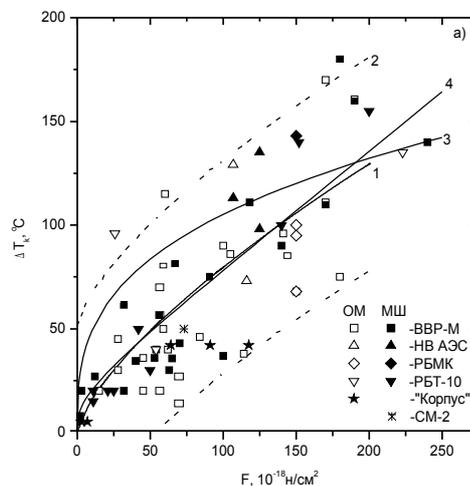
$$\Delta T_K = F^n \cdot \text{Ni}^a \cdot \text{Mn}^b \cdot \text{Si}^c \cdot \text{S}^d \cdot \text{P}^e \cdot \text{Cu}^f \cdot \text{Mo}^k, \quad (1)$$

где F – значение флюенса быстрых нейтронов ($E > 0,5 \text{ МэВ}$); Ni, Mn, Si, S, Mo, P, Cu – численные значения весовых концентраций соответствующих химических элементов; n, a, b, c, d, e, f, k – показатели степени.

Эта модель служила, в первую очередь, для определения показателя степени влияния флюенса, а также для выявления тех элементов, влияние которых на радиационное охрупчивание значимо в рамках анализируемой базы данных. При этом, априори, в число изучаемых элементов не были включены те компоненты стали, инертность которых была ранее продемонстрирована специальными опытами по влиянию легирующих элементов на металле лабораторных плавов [1-6]. К ним были отнесены хром, ванадий, углерод.

Прежде чем перейти непосредственно к результатам статистического анализа, следует вкратце остановиться на вопросе о возможной зависимости экспериментальных данных от условий облучения. Как уже указывалось выше, образцы облучались в активной зоне реактора ВВР-М, в пустом топливном канале реактора РБМК-К (ЛАЭС) и в канале реактора ВВЭР-1000 (НВАЭС-5), а также в каналах реактора РБТ-10 НИИАР. Кроме того, для увеличения представительности данных в расчетах были использованы опубликованные [17] данные НИИАР по основному металлу стали 15Х2НМФА-А плавка 102253/2

(результаты опытов в устройстве «Корпус» реактора РБТ-6). Для всех перечисленных облучательных позиций плотность потока быстрых нейтронов отличается в пределах одного порядка, и экспериментальные точки, нанесенные на общий график (рис. 1), не обнаруживают явных признаков обособления в зависимости от места облучения образцов. Поэтому в дальнейшем анализе разделение данных в зависимости от места облучения не производилось.



$$1 - \Delta T_K = 3.9 \cdot (\text{Ni} - 0.28)^{1.176} \cdot F^{0.7}; \quad 2 - \Delta T_K = 3.9 \cdot (\text{Ni} - 0.28)^{1.176} \cdot F^{0.7} \pm 51.5; \quad 3 - \Delta T_K = A_F \cdot F^{0.33} \quad (A_F = 23 - (a); A_F = 20 - (b)); \quad 4 - \Delta T_K = 8.08 \cdot F^{0.33} + 0.34 \cdot (\text{Ni} - 0.28)^{1.915} \cdot F^{1.114}$$

Рис. 1. Зависимость радиационного охрупчивания Cr-Ni-Mo-V-стали и металла ее сварных швов (Ni=0.96...1.36%) – (а), а также металла сварных швов Cr-Ni-Mo-V-стали (Ni=1.6...1.8%) – (б) от флюенса нейтронов

Первоначально были выделены три группы материалов: основной металл, металл сварных швов с содержанием никеля 0.96...1.36% и металл сварных швов с содержанием никеля 1.53...1.80%. Выполненный для каждой из групп анализ обнаружил значимую корреляцию величины ΔT_K только для флюенса нейтронов. Тем самым подтверждается, что для

описания дозовой зависимости охрупчивания рассматриваемых материалов приемлемым является соотношение вида:

$$\Delta T_K = C \cdot F^n, \quad (2)$$

где C – константа, зависящая от химического состава; n – показатель степени.

В результате анализа установлено, что рассчитанные для двух выборок (основной металл и металл сварных швов с низким содержанием никеля и металл сварных швов с высоким содержанием никеля) величины n весьма значительно отличаются от нормативного значения $n=0.33$. При этом показатель степени для материалов с пониженным содержанием никеля равен 0.71, а для металла сварных швов с высоким содержанием никеля составляет 0.68. Различия полученных цифр меньше стандартной ошибки их определения, так что зависимости n от содержания Ni установить не удается.

Ни один из химических элементов, включенных в соотношение (1), в том числе фосфор и медь, известные своим эффективным влиянием на радиационное охрупчивание, значимой корреляции с величиной ΔT_K не обнаруживает. Это обстоятельство не должно удивлять, поскольку для каждой из трех выделенных групп материалов концентрация анализируемых легирующих и примесных элементов изменялась в довольно узких пределах, причем неравномерно. Таким образом, на фоне естественного разброса данных, обусловленного погрешностями измерения ΔT_K и флюенса, а также возможной нестабильностью температурного режима облучения, их влияние не удается отследить на статистическом уровне. В этом отношении никель не составил исключения. Значимое влияние последнего элемента выявляется только при объединении имеющихся выборок в единый массив, в котором пределы вариации содержания никеля расширены до 0.96...1.8%.

Дополнительно в этот массив были включены также данные НИИАР [17] по металлу сварных швов стали 15X2НМФА-А. В их числе представлены 10 швов с содержанием никеля 1.53...1.76% и 1 шов с 1.30% Ni . Совокупный массив данных составил в итоге 99 экспериментальных точек. При этих обстоятельствах зависимость ΔT_K от содержания никеля вполне отчетлива: его парциальный коэффициент корреляции в соотношении (1) надежно выявляется и составляет 0.6 при стандартном отклонении 0.08. При этом особенно важно, что показатель степени « n » в этом соотношении меняется от 1.33 до 1.53 в зависимости от числа анализируемых, помимо флюенса нейтронов и концентрации никеля, переменных. Этот результат является свидетельством весьма резко выраженной концентрационной зависимости охрупчивания от содержания никеля.

С учетом полученных результатов дальнейший анализ совокупного массива данных был направлен на более детальное уточнение влияния никеля, в частности, на выявление возможного латентного эффекта в концентрационной зависимости. Расчеты

были выполнены с использованием следующей модели:

$$\Delta T_K = C_1 \cdot (\%Ni - C_2)^m \cdot F^n, \quad (3)$$

где C_1 , C_2 и m – коэффициенты регрессии. Показатель степени $n=0.7$ был взят как средняя величина значений n , полученных для двух частных выборок.

В итоге выполненных расчетов получено следующее уравнение регрессии:

$$\Delta T_K = 3.9 \cdot (\%Ni - 0.28)^{1.176} \cdot F^{0.7}. \quad (4)$$

Это соотношение характеризуется коэффициентом корреляции $CC=0.96$ и стандартным отклонением $\sigma=25.96$. Из него следует, что увеличение содержания никеля вызывает рост радиационно-индуцированного сдвига ΔT_K приблизительно пропорционально некоторой эффективной концентрации этого элемента, которая меньше реальной ее величины на 0.28%. Использование данной формулы допустимо только для интервала концентраций 1.0...1.8% Ni . В случае выборки данных для материалов с низким содержанием никеля модель (4) ($Ni=1.1\%$) характеризуется коэффициентом корреляции 0.83, а для материалов с повышенным содержанием никеля ($Ni=1.7\%$) коэффициент корреляции равен 0.86. Вид расчетных кривых дозовой зависимости ΔT_K для четырех различных концентраций никеля, охватывающих интервал 1.0...1.9%, иллюстрирует рис. 2.

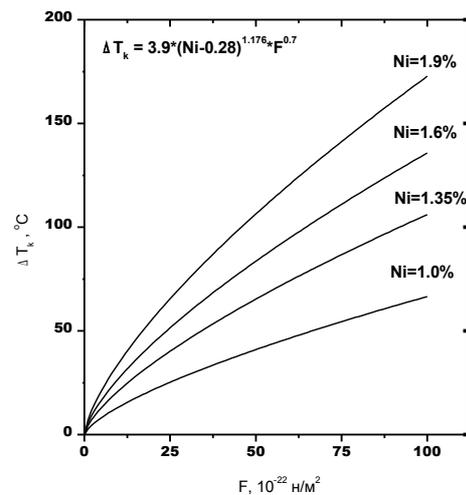
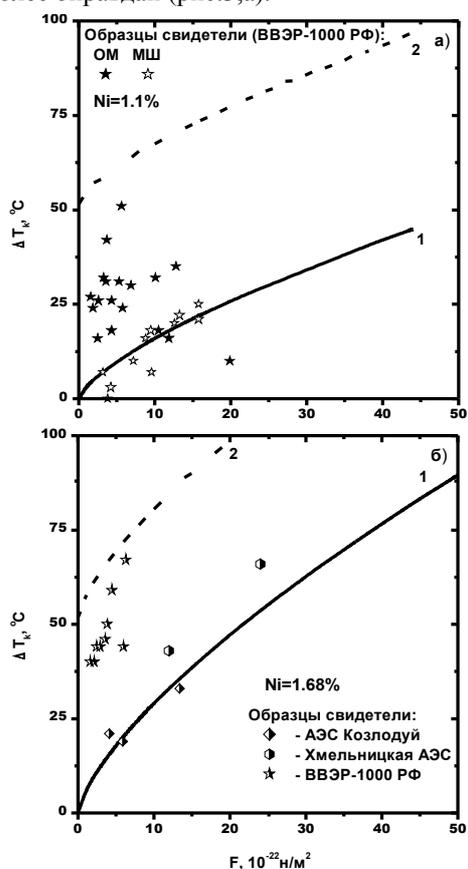


Рис. 2. Расчетные дозовые зависимости сдвига температуры вязко-хрупкого перехода для Cr-Ni-Mo-V-сталей и металла сварных швов с варьируемым содержанием никеля

Сопоставление рассчитанных по формуле (4) дозовых зависимостей охрупчивания для материалов со средним для исследованных групп материалов содержанием никеля 1.12% (основного металла и металла сварных швов) (рис. 1,а) и 1.68% (рис. 1,б) с нормативными кривыми $\Delta T_K = A_F \cdot F^{0.33}$ свидетельствует о том, что формула (4) дает более консервативное представление о темпе роста ΔT_K с увеличением флюенса до $\sim 1 \dots 1.5 \cdot 10^{24} \text{ н/м}^2$ по сравнению с формулой нормативной зависимости. Граница доверитель-

ного интервала с вероятностью 0.95 для модели (4) является достаточно консервативной для всех имеющих данных.

В консервативности верхней границы данных, описываемой соотношением (4), можно убедиться также на основании ее сопоставления с опубликованной [18-20] информацией по испытанию образцов-свидетелей реакторов ВВЭР-1000, облучение которых производилось при плотности потока быстрых нейтронов порядка 10^{15} н/м².с. Из рис. 3,б явствует, что соотношение (4) достаточно консервативно по отношению к изменениям ΔT_K металла сварных швов с содержанием никеля свыше 1.6 %. Для основного металла стали 15X2НМФАА и металла ее сварных швов с содержанием никеля 1.0...1.36 % этот вывод тем более оправдан (рис.3,а).



$$1-\Delta T_K=3.9 \cdot (Ni-0.28)^{1.176} \cdot F^{0.7}; \quad 2-\Delta T_K=3.9 \cdot (Ni-0.28)^{1.176} \cdot F^{0.7} \pm 1.5$$

Рис. 3. Сопоставление дозовых зависимостей радиационного охрупчивания для Cr-Ni-Mo-V-стали и металла ее сварных швов (Ni=1.1%) – (а), а также для металла сварных швов (Ni=1.7%) – (б) с данными по образцам-свидетелям [19-21]

Зависимость радиационного охрупчивания от содержания никеля, характеризуемая соотношением (4), неправомерно распространять на материалы с содержанием никеля заметно ниже 1.0%.

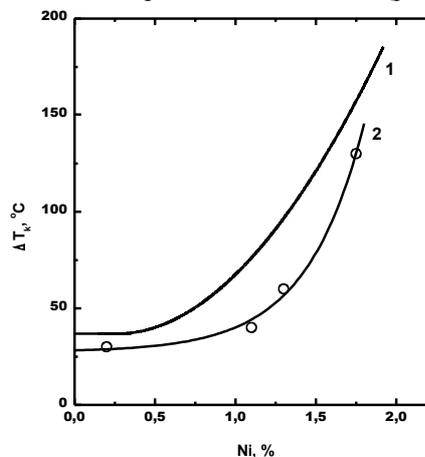
В то же время такого рода прогноз может быть крайне необходимым для предварительной оценки

чувствительности к радиационному повреждению новых перспективных корпусных материалов [21], разрабатываемых применительно к корпусам реакторов типа ВВЭР повышенной мощности со сроком службы 60 лет. В частности, речь идет о модификации стали 15X2НМФА-А (класс 0), в которой содержание никеля ограничивается пределами 0.6...0.8%. Для накопления сколь угодно существенной базы экспериментальных данных по радиационной стойкости этого материала потребуется немало времени, тогда как хотя бы самые ориентировочные оценки требуются уже в настоящее время.

Для выполнения подобных оценок была использована модель, представляющая собой суперпозицию двух функций, из которых одна имеет вид, аналогичный соотношению (4), а другая описывает пропорциональную кубическому корню из флюенса дозовую зависимость охрупчивания стали марки 15X2МФА и металла ее сварных швов [22] с реальным содержанием никеля 1...0.2%:

$$\Delta T_K=685 \cdot (P+0.1Cu) \cdot F^{0.33}+C_1 \cdot (\%Ni-0.28)^m \cdot F^n. \quad (5)$$

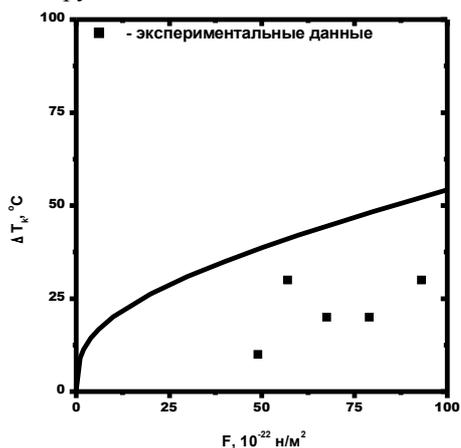
В данном случае параметрами подгонки являлись константа C_1 и показатели степени “m” и “n”. В итоге выполненного для совокупного массива данных расчета получены значения $C_1=0.34$, $m=1.9$, $n=1.114$. С использованием этих констант расчетную зависимость ΔT_K от концентрации никеля, вытекающую из (5) полезно сопоставить с экспериментальными данными [15], полученными в РНЦ «Курчатовский институт» на металле лабораторных плавок после облучения флюенсом $1 \cdot 10^{24}$ н/м² при температуре 270°С. Сравнение расчетной концентрационной зависимости с экспериментом показывает, что формула (5) в целом дает заметно более высокие значения сдвига ΔT_K , но в качественном отношении эффект никеля в обоих случаях весьма сходен, хотя в эксперименте наблюдается слабая зависимость в интервале концентраций 0...1.0 и несколько более сильная зависимость в интервале 1.0...1.75% Ni (рис. 4).



$$\Delta T_K=685 \cdot (P+0.1Cu) \cdot F^{0.33}+0.34 \cdot (\%Ni-0.28)^{1.9} \cdot F^{1.114}$$

Рис. 4. Зависимости сдвига температуры вязко-хрупкого перехода для Cr-Ni-Mo-V-сталей с величиной примесного эквивалента $P+0.07Cu=0.0135$ от содержания никеля при облучении флюенсом $1 \cdot 10^{24} \text{ н/м}^2$ ($E > 0,5 \text{ МэВ}$); 1 – расчетная кривая; 2 – экспериментальные данные [15]

Применительно к стали 15X2НМФА-А класса 0 расчетная, согласно (5), дозовая зависимость охрупчивания для концентрации никеля 0.75%, фосфора 0.007% и меди 0.06% показана на рис. 5. Здесь же приведены несколько экспериментальных точек, полученных в НИИАР [23] для металла опытной плавки с соответствующим содержанием никеля и примесных элементов. Облучение образцов производилось в устройстве «Корпус». Сопоставление этих данных с полученной расчетной кривой, описывающей медиану, свидетельствует, что даже последняя дает достаточно консервативный прогноз относительно поведения новой стали в условиях облучения. Это мнение, однако, еще предстоит подтвердить при больших значениях флюенса экспериментами, намеченными в рамках аттестационной программы на металле крупнотоннажной поковки.



$$\Delta T_k = 685 \cdot (P + 0.1Cu) \cdot F^{0.33} + 0.34 \cdot (\%Ni - 0.28)^{1.9} \cdot F^{1.114}$$

Рис. 5. Сопоставление расчетной кривой дозовой зависимости ΔT_k для стали 15X2НМФА-А класс 0 (0.75%Ni, 0.007%P, 0.06%Cu) с экспериментальными данными [23]

3. ВЫВОДЫ

1. В результате исследования радиационного охрупчивания основного металла стали марки 15X2НМФА-А промышленного производства и металла ее сварных швов, выполненных в производственных условиях сварочной проволоки марок Св-08ХГНМТА и Св-12Х2Н2ММА, для условий облучения при температуре $285 \pm 10^\circ$ и в интервале значений флюенса $10^{22} \dots 2 \cdot 10^{24} \text{ н/м}^2$ установлено, что дозовая зависимость роста температуры вязко-хрупкого перехода у указанных материалов может быть описана степенной функцией с показателем степени $n = 0.7$.

2. Увеличение в изученных материалах содержания никеля в пределах 1.0...1.9% вызывает усиление эффекта охрупчивания, в первом приближении, пропорционально концентрации этого элемента. Влияние других компонентов, в том числе таких активно влияющих на усиление радиационного охрупчивания как P, Cu и Mn, статистическим анализом не выявляется вследствие узких пределов вариации их содержания в материалах, произведенных в промышленных условиях по действующим ТУ.

3. При оценке сопротивления хрупкому разрушению и ресурса корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 для описания дозовой зависимости радиационного охрупчивания допустимо использование соотношения:

$$\Delta T_k = 3.9 \cdot (\%Ni - 0.28)^{1.176} \cdot F^{0.7} + 51.5.$$

По отношению к стали 15X2НМФА-А и металлу ее сварных швов это уравнение правомерно применять при содержании в данных материалах примесных элементов (P и Cu) на уровне, ограниченном требованиями соответствующих технических условий и при величине флюенса нейтронов до $1 \cdot 10^{24} \text{ н/м}^2$.

4. Для новой Cr-Ni-Mo-V-стали с содержанием никеля в промежуточном интервале концентраций (0.4...0.8%) предварительная оценка радиационной стойкости может быть произведена на основе соотношения:

$$\Delta T_k = 685 \cdot (P + 0.1Cu) \cdot F^{0.33} + 0.34 \cdot (\%Ni - 0.28)^{1.9} \cdot F^{1.114}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Николаев, В.И. Баданин // *Изв. АН ССР, Металлы*. 1975, №2, с. 126 – 132.
2. И.В. Горынин, В.А. Николаев, В.И. Баданин, А.М. Морозов // В кн.: *Материалы I Всесоюзного совещания* (Киев, 1975). Киев: «Наукова думка», 1976, с. 59 – 68.
3. В.А. Николаев, В.И. Баданин // *Атомная энергия*. 1974, т. 37, в.6, с. 491 – 493.
4. В.А. Николаев, В.И. Баданин // *МиТОМ*. 1979, №9, с. 21 – 22.
5. В.А. Николаев, В.И. Баданин // *Атомная энергия*. 1976, т.41 в.6, с. 422 – 425.
6. В.А. Николаев, В.И. Баданин // В кн.: *Материалы II Всесоюзного совещания* (Киев, 1976). Киев: «Наукова думка», 1977, с. 75 – 85.
7. В.И. Баданин, И.Н. Грекова, Ю.И. Звездин, В.А. Николаев // *Вопросы судостроения. Серия «Металловедение*. 1977, в. 24, с. 3 – 9.
8. Трюдо Л. // В кн.: *Труды II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)*, т.6, М.: «Атомиздат», 1959, с. 427 – 434.
9. U. Potapovs, J.R. Hawthorne // *Nucl. Applic.* 1969, v. 6, p. 27 – 46.
10. J.R. Hawthorne // *ASTM, STP*. 1971, №484, p. 96 – 127.

11. A.E. Powers // *ASTM, STP*. 1973, № 529, p. 31 – 45.
12. J.R. Hawthorne // *J. Testing Evaluation; Amer. Soc. Testing Mat.* 1973, p. 439.
13. А.М. Морозов, В.Н. Николаев, Е.В. Юрченко, В.Г. Васильев. Влияние никеля на радиационное охрупчивание основного металла и металла сварных швов стали 15Х2НМФА-А // *Труды VI Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС*. Санкт-Петербург, 2000. Т. 2, с. 372 – 396.
14. А.М. Морозов, В.Н. Николаев, Е.В. Юрченко. Влияние химического состава материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 на дозовую зависимость их радиационного охрупчивания // *Труды VII Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС»*. Санкт-Петербург, 2002. Т. 3, с. 136 – 149.
15. А.М. Крюков, Д.Ю. Ерак, Ю.Р. Кеворкян, П.А. Платонов, Я.И. Штромбах. Актуальные проблемы радиационного охрупчивания материалов корпусов ВВЭР // *Труды VII Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС»*. Санкт-Петербург, 2002. Т. 3, с. 91 – 117.
16. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭГ 7-002*. М: «Энергоиздат», 1989.
17. V.K. Shamardin, V.N. Golovanov. *Irradiation embrittlement and mitigation. Preceding of the IAEA specialists Meeting* // Gloucester, England, UK, 14-17 May, 2001.
18. A.M. Kryukov, D.Y. Erak, L. Debarberis, F. Sevinci, B. Acosta. *Extended Analysis of VVER-1000 Surveillance Data* // RRC-KI, Russia, Moscow, Joint Research Center, JRC, of the European Commission Institute for Advance Materials, JRC-IAM, Petten JRC Petten.
19. Sc. St. Vodenicharov, Tz. Kamenova. *Neutron Aging of WVER 1000 Weld Metal* // *IAEA Specialist Meeting on Irradiation Embrittlement and Mitigation*, Gloucester, UK, May 14-17, 2001.
20. E.U. Grynuk, V.D. Gukalova, L.I. Chyrko, V.N. Revka, A. Ballesteros, L. Debarberis, A. Kryukov. *Results from Surveillance Programme and their Analysis* // *IAEA Specialist Meeting on Irradiation Embrittlement and Mitigation*, Gloucester, UK, May 14-17, 2001.
21. И.В. Горынин, В.В. Рыбин, Г.П. Карзов, Г.Н. Филимонов и др. Создание и совершенствование сталей для корпусов реакторов атомных энергетических установок с водой под давлением // *Вопросы материаловедения*. 1999, в. 3(20), с. 392 – 400.
22. В.А. Николаев, Л.Н. Рядков. Роль спектра и плотности нейтронного потока в радиационном охрупчивании стали марки 15Х2МФА и металла ее сварных швов // *Юбилейный сборник. Радиационное материаловедение и конструкционная прочность реакторных материалов* г. С.-Петербург: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», 2002, с. 200 – 211.
23. В.А. Цыканов, В.Н. Голованов, Т.Н. Колесова и др. Оценка радиационного охрупчивания стали 15Х2МФАА с 0,75%Ni и коррозионностойкой наплавки 02Х18Н10Б после облучения в стенде «Корпус» // *Сб. докладов V Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению*, г. Димитровград, 1998. Т.2, ч.1, с. 40 – 53.

ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ТА ДОМІШКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА РАДІАЦІЙНЕ ОКРИХЧЕННЯ КОРПУСНИХ МАТЕРІАЛІВ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000, ЯКІ МІСТЯТЬ НІКЕЛЬ

А.М. Морозов, В.А. Ніколаєв, Є.В. Юрченко

Наведені результати експериментального дослідження Cr-Ni-Mo-V сталі та металу зварних швів промислового виробництва із вмістом нікелю від 1.0 до 1.8 % Ni, яке було виконано в різних дослідницьких (ВВР-М, РБТ-10) та енергетичних (ВВЕР-1000, РБМК) реакторах при щільності потоку швидких нейтронів $10^{16} \dots 10^{17}$ н/м² та температурі опромінення $\sim 290^{\circ}$ С. За підсумками експерименту виконано математико-статистичний аналіз залежності радіаційно-індукованого зсуву температури в'язко-крихкого перехлду ΔT_k від величини флюенса швидких нейтронів в інтервалі $10^{22} \dots 3 \cdot 10^{24}$ н/м² та від вмісту легируючих та домішкових елементів, реально чи потенційно здатних впливати на чутливість матеріалу до опромінення (Ni, Mn, P, Cu, Si, S). Завдяки вузьким границям варіації вмісту цих елементів, за виключенням нікелю, (завдяки відповідним обмежень за ТУ), виявлено вплив тільки останнього. Отримано емпіричне співвідношення, яке описує дозову залежність ΔT_k степеневої функції із значно відрізняючимся показником ступеня ≈ 0.7 , в якому врахован вплив концентрації нікелю при його зміні у межах 1.0...1.8%. Прдемонстрована достатня консервативність отриманої формули по відношенню до опублікованих результатів випробувань зразків-свідків матеріалу корпусів реакторів ВВЕР-1000Б опромінених при щільності потоку нейтронів порядку 10^{15} н/м²с. Виконано оцінку можливості використання співвідношення для прогнозування окрихчення сталі із вмістом нікелю < 1.0 %.

ON EFFECT OF ALLOYING AND IMPURITY ELEMENTS ON RADOATION EMBRITTLEMENT OF NICEL CONTAINING MATERIAL OF REACOR WVER-1000 VESSEL

A.M. Morozov, V.A. Nikolaev, E.V. Jurtchenko

The paper gives the results of an experimental investigation of the Cr-Ni-Mo-V steels and metal its welded industrial production with contents of the nickel from 1.0 before 1.8%Ni, conducted in different research (VVR-M, RBT-10) and energy (VVER-1000, RBMK) reactors at flux density of the fast neutron $10^{16} \sim 10^{17}$ n/m²s with and the temperature of the irradiation $\sim 290^{\circ}$ C. On total of the experiment is executed mathematician-statistical analysis to dependencies irradiation-induced shift of the transition temperature T_k from fluence value of fast neutron in interval $10^{22} \dots 3 \cdot 10^{24}$ n/m² and from contents alloying and impurity element, real or potentially capable to influence on sensitivity of the material to irradiation (Ni, Mn, P, Cu, Si, S). Because of narrow limit variation contents these element, with the exclusion of nickel (in view of corresponding to restrictions on TU), is revealed influ-

ence only last. It is received empirical correlation describing dose dependency T_k power-mode function with greatly differing from normative factor degree $n=0.7$ and taking into account influence to concentrations of the nickel under its change to limit 1.0...1.8%. It is demonstrated sufficient conservatism of the got formulas to published result of the test surveillance of the reactor pressure vessel material VVER-1000, irradiated at density of the flow neutron order $10^{15}n/m^2 s$. Made estimation of the possibility of the use the correlation for forecast охрупчивания become with contents of the nickel $<1.0\%$.