

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 НА ДОЗОВУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ИХ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ

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

В роботі наведені експериментальні результати дослідження впливу легуючих (Ni, Mn) та домішкових (P, Cu) елементів на схильність до радіаційного окрихнення низьколегованих корпусних матеріалів в умовах високопоточного опромінення в дослідницьких та промислових реакторах, а також узагальнені дані по радіаційному окрихненню матеріалів корпусів водо-водяних реакторів ВВЕР-1000 (основний метал та метал зварних швів сталі 15X2НМФА-А). Особлива увага приділена зростанню радіаційного окрихнення матеріалу зварних швів при вмісті нікелю більш за 1.5 %.

На основі аналізу експериментальних результатів зміни властивостей промислового металу (в тому числі архівного металу діючих ВВЕР-1000) під впливом нейтронного опромінення зроблено висновок про необхідність корегування співвідношення для опису дозової залежності радіаційного окрихнення металу зварних швів з урахуванням підвищеного вмісту в них нікелю.

В работе приведены экспериментальные результаты исследования влияния легирующих (Ni, Mn) и примесных (P, Cu) элементов на склонность к радиационному охрупчиванию низколегированных корпусных материалов в условиях высокопоточного облучения в исследовательских и промышленных реакторах, а также обобщены данные по радиационному охрупчиванию материалов корпусов водо-водяных реакторов ВВЭР-1000 (основной металл и металл сварных швов стали 15X2НМФА-А). Особое внимание уделено усилению радиационного охрупчивания материала сварных швов при содержании никеля более 1,5%.

На основе анализа экспериментальных результатов изменения свойств промышленного металла (в том числе архивного металла действующих ВВЭР-1000) под воздействием нейтронного облучения сделано заключение о необходимости корректировки соотношения для описания дозовой зависимости радиационного охрупчивания металла сварных швов с учетом повышенного содержания в них никеля.

The paper gives the results of an experimental investigation into the effects of alloying (~0.2...3.0% Ni, ~0.5...3.0% Mn) and impurity (~0.004...0.035% P, ~0.05...0.35% Cu) elements on susceptibility to irradiation embrittlement of low-alloy vessel materials under high-intensity irradiation conditions used in research and commercial reactors as well as generalizes data on the irradiation embrittlement of materials used in WWER-1000 vessels (the base metal of 15X2НМФА-А steel and its weld metal). Special attention is paid to irradiation embrittlement enhancement in the weld materials containing more than 1.5% Ni.

Relying on the analysis of experimental observations on the change in commercial metal properties (including an archive metal of WWERs -1000 now in operation) under neutron irradiation, it was concluded that the relationship describing the dose dependence of irradiation embrittlement of the weld metal taking into consideration its increased Ni contents is to be corrected.

РОЛЬ NI, MN, P И CU В РАДИАЦИОННОМ ОХРУПЧИВАНИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Корпуса атомных реакторов типа ВВЭР-1000 изготовлены из низколегированных материалов, содержащих Ni на уровне ~1% и выше. Особенно высокое его содержание выявлено в металле сварных швов, в которых его уровень достигает ~1,9%. Никель способен усиливать радиационное охрупчивание (РО) и поэтому проблема его влияния на деградацию свойств материала под облучением имеет как научный, так и практический интерес. Важно отметить, что степень его негативного влияния зависит от уровня содержания в материале примесных элементов, таких как P и его аналоги (Sb, Sn, As). К элементам, усиливающим радиационное повреждение, относится, как хорошо известно, и Cu. Кроме того, заслуживает внимания роль марганца в изменении свойств корпусных материалов под облучением, поскольку с ростом концентрации Mn, как и с

ростом содержания Ni, наблюдается усиление радиационного охрупчивания.

С учетом роли упомянутых элементов в работе проанализированы (по доступным данным) зависимости радиационного охрупчивания стали 15X2НМФА-А и металла ее сварных швов, при этом значительная часть исследованного металла представляет собой металл архивных проб материалов корпусов реакторов (КР) изготовленных ВВЭР-1000.

Представленные в работе данные исследования влияния Ni, Mn, Cu и P на склонность к радиационному охрупчиванию низколегированных корпусных материалов и (или) бинарных сплавов основаны на результатах ранее выполненных работ.

Наиболее ранние экспериментальные данные по влиянию Ni на радиационное охрупчивание конструкционных материалов были получены в ЦНИИ КМ «Прометей» для стали 2,5% Cr -6% Mo -0,3% V базовой композиции, изготовленной в лабораторных условиях [1]. Представленные на рис.1 за-

висимости показывают влияние концентрации никеля при температуре облучения ~ 350 и $\sim 50^\circ\text{C}$ на вызванное облучением смещение температуры вязкохрупкого перехода ΔT и возрастание предела текучести $\Delta\sigma_{0,2}$. Очевидно, что изменение свойств в большой степени зависит от температуры облучения.

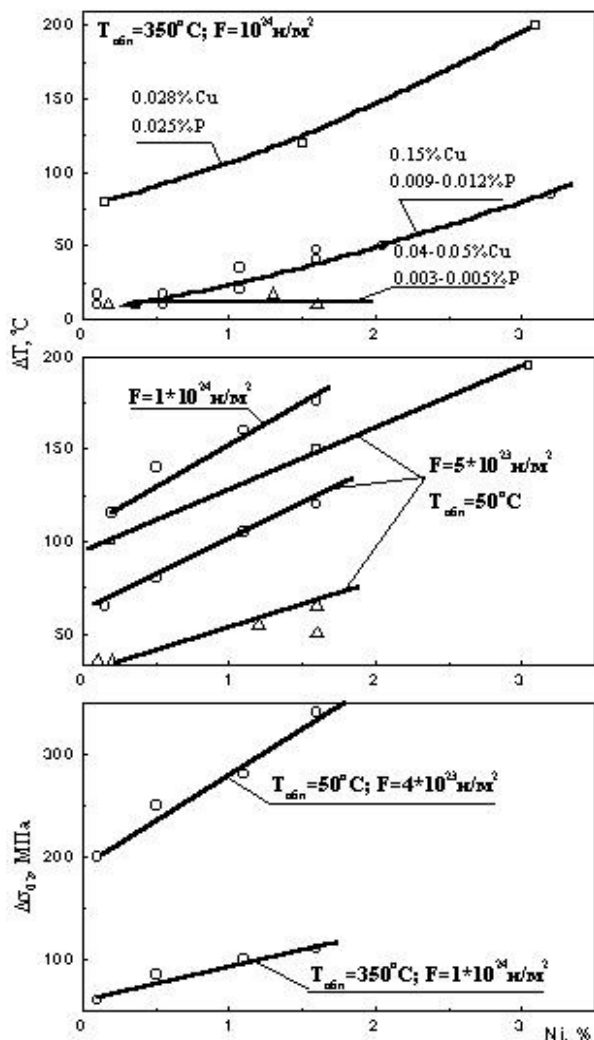


Рис.1. Влияние Ni на радиационное охрупчивание и упрочнение Cr-Mo-V стали с различным содержанием примесных элементов

При температуре $\sim 350^\circ\text{C}$ влияние добавок Ni определяется концентрацией примесей. Когда сталь содержит 0,025% P и 0,28% Cu, ее охрупчивание монотонно возрастает с ростом концентрации никеля. В то же самое время поведение стали, исследованной при упомянутых условиях облучения, не показывает какой-либо чувствительности к изменению концентрации никеля, когда уровень примесных элементов очень низок (0,003...0,005% P, 0,04...0,05% Cu).

При низкотемпературном облучении ($\sim 50^\circ\text{C}$) линейный рост ΔT с ростом содержания Ni от 0 до 3% наблюдается независимо от уровня содержания примесей. Но опять, как и при температуре облуче-

ния $\sim 350^\circ\text{C}$, наибольшая величина ΔT наблюдается при наибольшем содержании в стали примесей.

Радиационное упрочнение стали воспроизводит в общих чертах картину вышеупомянутого сдвига ΔT . Это сходство указывает на тот факт, что оба явления коррелируют и, возможно, контролируются одними и теми же микроструктурными факторами.

Отмеченная негативная роль примесей, прежде всего фосфора, в радиационном охрупчивании при исследовании влияния никеля имела и прямое подтверждение [2-4], когда варьировалось содержание лишь одного примесного элемента при сохранении концентрации других компонентов состава. Наиболее ранние, полученные на стали 15X2НМФА данные [2] показывают (см. рис.2) существенное усиление радиационного охрупчивания с ростом содержания P как при повышенной ($300...350^\circ\text{C}$), так и пониженной ($\sim 50^\circ\text{C}$) температурах облучения.

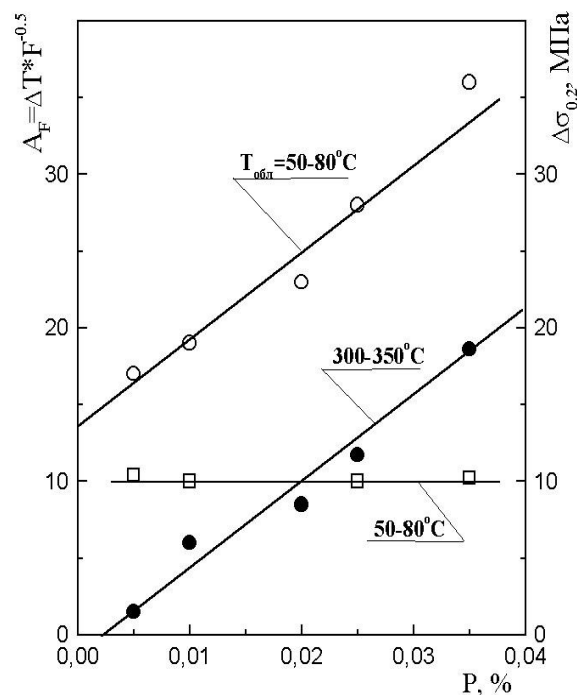


Рис.2. Влияние фосфора в стали типа 15X2НМФА на коэффициент радиационного охрупчивания A_F (O, ■) и прирост предела текучести $\sigma_{0,2}$ (□) после облучения флюенсом $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$ с $E \geq 0,5 \text{ Мэв}$

Близкое по характеру с рассмотренным выше влиянием Ni на изменение ΔT под облучением стали Cr-Mo-V-композиции было обнаружено и в случае экспериментальных сварных швов с вариацией содержания не только Ni, но и Mn в пределах $\sim 0,7...2,2\%$ и $\sim 0,45...1,0\%$ соответственно [5]. Cr-Mo-V – основа сварной пробы, а также и режим термической обработки исследованных сварных швов были практически теми же, как и в случае материалов КР промышленных ВВЭР-1000. Концентрация P и Cu в металле этих сварных швов была на уровне 0,011...0,012% и 0,17...0,19% соответственно. Приблизительно линейный рост величины ΔT с увели-

чением содержания вышеупомянутых (Ni и Mn) элементов отмечен как при температуре облучения ~290...310°C, так и ~50°C (см.рис.3). Для того, чтобы понять роль Ni в РО, следует обратиться к данным по влиянию Ni на тепловую хрупкость стали [6]. Изменение температуры вязко-хрупкого перехода 2,5%Cr-0,6%Mo-0,3%V стали с ~ 0,015% фосфора, подвергнутой термическому старению при температуре 340, 425 и 500°C в течение 6000 ч, представлено на рис.4 в зависимости от содержания никеля.

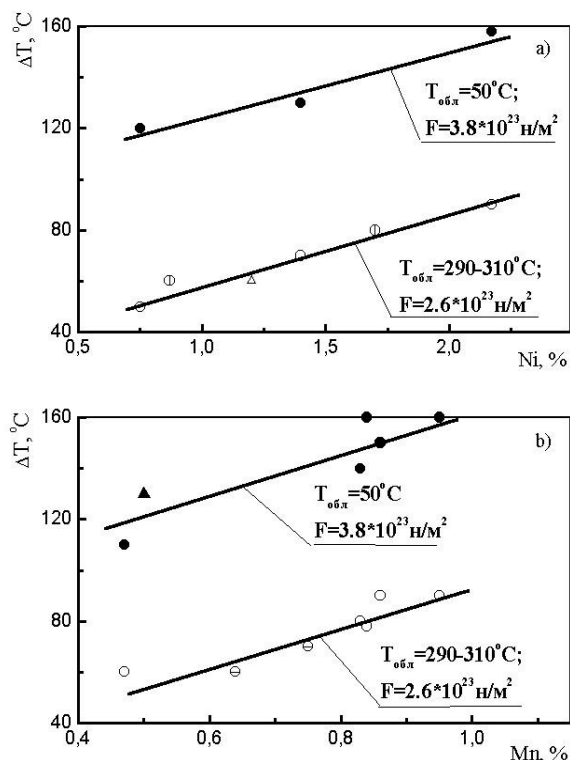


Рис.3. Влияние содержания Ni (a) и Mn (b) на радиационное охрупчивание металла экспериментальных сварных швов

Очевидное сходство влияния никеля на тепловое и радиационное охрупчивание позволяет сделать предположение, что его роль почти одинакова в обоих явлениях. В любом случае никель способствует охрупчиванию путем понижения зернограничных сил связи (зернограничного сцепления) вследствие сегрегации фосфора. Это мнение основано на том, что для никельсодержащей стали с концентрацией фосфора 0,025% вид излома для облученных при ~300°C образцов является интеркристаллитным, как и в случае тепловой хрупкости [7].

В этом отношении влияние никеля подобно влиянию марганца на тепловую хрупкость и радиационное охрупчивание. Оба элемента стимулируют развитие зернограничной равновесной (т.е. тепловой) и внутрикristаллитной неравновесной (т.е. радиационно-наведенной) сегрегации примесных элементов, подобно P, Sb, Sn. Присутствие последних в стали является поэтому необходимым условием для реализации наблюдаемого неприятного механизма

влияния Ni и Mn. Кроме того, очевидно прямое участие Ni в радиационном охрупчивании. Это мнение [7,8] основано на факте, что при низкотемпературном облучении (~ 50°C) наблюдается сильное влияние Ni на радиационное упрочнение и охрупчивание не только в легированной стали (рис.1), но также и в бинарных Fe-Ni-сплавах с очень низким содержанием примесных элементов.

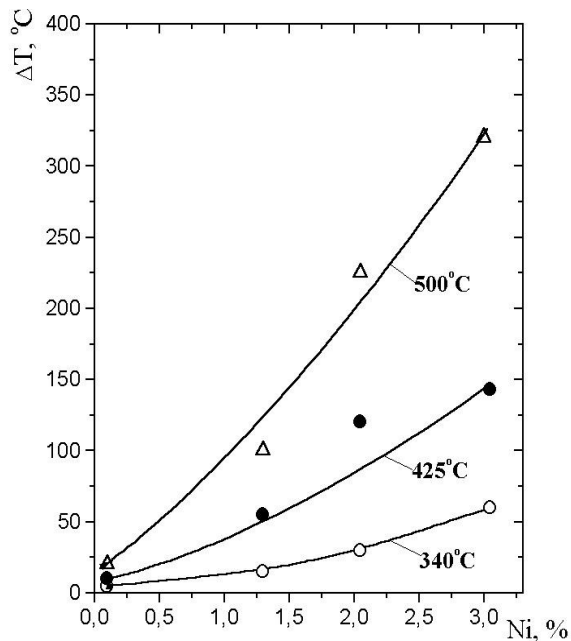


Рис.4. Повышение сдвига температуры вязко-хрупкого перехода в зависимости от содержания Ni в 2.5Cr-0.6Mo-стали после старения в течение 6000 ч

При этом и после облучения вид транскристаллитного излома поверхности разрушения образцов сохраняется. Резистометрические опыты [9] указывают на радиационно-индуцированное выделение атомов Ni и Mn из твердого раствора при низкотемпературном (~ 50°C) облучении (см. рис.5).

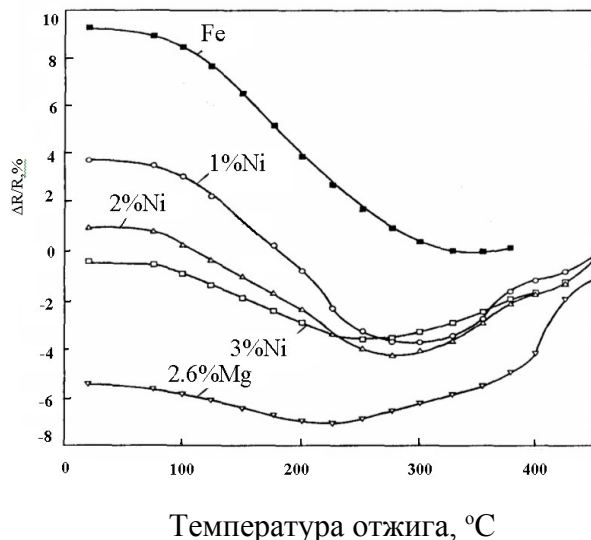


Рис.5. Влияние изохронального отжига на электросопротивление Fe-Ni и Fe-Mn – сплавов

РАДИАЦИОННОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

С учетом изложенной выше информации о роли Ni, Mn, P и Cu в РО низколегированных конструкционных материалов была предпринята попытка проанализировать закономерности РО стали и металла сварных швов, применяемых для корпусов реакторов ВВЭР-1000.

Для этой цели использована сталь 15X2НМФА-А промышленного производства в виде плит и поволоков (обечаек) и металл производственных сварных швов, в том числе металл архивных проб сварных соединений КР изготовленных ВВЭР-1000.

Химический состав, режимы термической обработки и исходные свойства исследованных материалов приведены в табл. 1 и 2 для основного металла и металла сварных швов соответственно.

Таблица 1

Содержание Ni, P, Cu и Mn в исследованной стали 15X2НМФА-А, режимы термической обработки, а также исходные свойства материалов

Маркировка	Весовое содержание, %				Режим термообработки	T _{исп} 20°C		T _к , °C
	Ni	P	Cu	Mn		□ _{0,2} , МПа	□ _в , МПа	
102753	1,15	0,010	0,04	0,48	Закалка в воду от 890°C; отпуск 650°C (10 ч); 625°C (25 ч), охлаждение на воздухе	565	671	-14
103991	1,01	0,010	0,03	0,45	Закалка в воду от 920...930°C; отпуск 660...650°C (14 ч); 630°C (13 ч), 650° (18 ч), охлаждение на воздухе	555	662	+8
190812	0,96	0,005	0,05	0,41	Закалка в воду от 925-935°C; отпуск 665...675°C (10,7 ч), охлаждение на воздухе	694	789	-60
Е-7029	1,05	0,010	0,058	0,50	920...930°C, воздух; отпуск 660-670°C (12,5 ч), воздух	630	720	-90
«Атом-маш» Д	1,26	0,010	0,05	0,49	Термическая обработка по характерному для КР ВВЭР-1000 режиму. Конкретный режим на заводе изготовителе.	-	-	-85
102253	1,17 (1,31)	0,010	0,05	0,51	Закалка в воду от 920°C; отпуск 650°C 25 ч, 610...620°C 19 ч.	630	730	-25

Из табл.1 видно, что в основном металле (сталь 15X2НМФА-А) концентрация Ni находится в довольно узких пределах (0,96...1,3%), в то время как в металле швов этот диапазон гораздо шире – ~1,1...1,8%. При последующем анализе данных по радиационному охрупчиванию металл сварных швов был разделен на две группы, существенно отличающихся друг от друга по содержанию никеля. Одна из них включала в себя швы с ~1,1...1,3% Ni, что существенно отличается от пределов содержания этого элемента в основном металле, а другая – швы с повышенной концентрацией Ni, а именно ~1,65...1,80%.

По содержанию фосфора и меди основной металл удовлетворял требованиям технических условий, предъявляемым к этой стали. Концентрация P и Cu составила 0,005...0,010 и 0,03...0,06% соответственно. Аналогично уровень содержания этих эле-

ментов в металле всех исследованных сварных швов был также достаточно низким и находился в пределах 0,007...0,015% P и 0,03...0,07% Cu.

Исследованный основной металл несущественно различался по содержанию марганца – его концентрация находилась в пределах 0,41...0,51%. Учитывая этот факт и незначительные различия исследованной стали по содержанию P и Cu, вполне можно допустить, что использованный в работе основной металл близок между собой по содержанию таких вредно влияющих на его радиационную повреждаемость элементов, как Mn, P и Cu. В металле сварных швов диапазон изменения концентрации марганца был заметно шире, чем в основном металле, и составил 0,39...1,07%, что дает, в принципе, основание предпринять попытку проанализировать роль как отдельно Mn, так и его совместное с Ni влияние на РО металла исследованных швов.

Таблица 2

Содержание Ni, P, Cu и Mn в исследованной стали 15X2НМФА-А, режимы термической обработки, а также исходные свойства материалов

Маркировка	Весовое содержание, %				Режим термообработки	T _{исп} 20°C		T _к , °C
	Ni	P	Cu	Mn		□ _{0,2} , МПа	□ _в , МПа	
260-5	1,10	0,010	0,03	0,92	610...620°C (25 ч), 640...650°C (10 ч), охлаждение с печью	534	628	-6
Е-8827Б	1,11	0,011	0,07	0,81	620°C (14,5 ч), 645°C (18,5 ч), воздух	548	640	+20
48-1	1,14	0,07	0,04	0,82	610...625°C (15,5 ч), 650...655°C (11,5 ч)	-	-	-9
В-1	1,36	0,015	0,04	0,90	630°C (30 ч), 650°C (20 ч) охлаждение с печью до 300°C, далее – воздух	559	627	-20
520-3	1,14	0,014	0,07	0,62	610...625°C (17,5 ч), 635...645°C (22 ч) охлаждение с печью	613	677	+10
520-9	1,13	0,012	0,06	1,11	610...625°C (10 ч), 640...650°C (10 ч) охлаждение с печью	548	641	+20
1	1,23	0,007	0,06	0,75	650°C (20 ч)	638	-	+20
47-1	1,24	0,010	0,018	0,74	610-625°C (11ч), 635...655°C (11 ч) охлаждение с печью	512	606	+4
220-7А	1,14	0,009	0,05	0,81	610...620°C (25 ч), 640-650°C (10ч) охлаждение с печью	494	606	-15
Колшов №3	1,29	0,011	0,06	0,61	620°C (5 ч), 650°C (10 ч) охлаждение с печью	-	-	+20
200-1А	1,78	0,008	0,03	0,81	610...625°C (25 ч), 640...645°C (10 ч) охлаждение с печью	544	627	-2
530-А6	1,77	0,010	0,04	1,07	610...615°C (11 ч), 640...645°C (9 ч) охлаждение с печью	504	613	+9
550-8А	1,80	0,009	0,03	1,03	610...620°C (20 ч), 640...650°C (10 ч) охлаждение с печью	586	-	+31
Атоммаш «М»	1,72	0,008	0,05	0,82	*	*	*	-10
260-11	1,70	0,008	0,06	0,39	610...630°C (17,5 ч), охлаждение с печью до 400°C, 640...645°C (9 ч 20 мин) охлаждение с печью до 300°C	547	640	-48
530-32	1,65	0,011	0,02	0,76	6107...620°C (14 ч), 640...650°C (9,5 ч), охлаждение с печью	523	-	-24

* - информацией владеет завод-изготовитель

Облучение образцов, проведенное в исследованных реакторах ВВР-М ПИЯФ РАН, СМ-2, РБТ-6 и РБТ-10 НИИАР, а также в промышленном реакторе РБМК ЛАЭС, характеризовалось относительно высокой плотностью потока нейтронов ($\sim 10^{13}$ н/см²·с с $E \geq 0,5$ Мэв), а облучение в реакторе 5-го блока НВАЭС проведено при плотности $10^{12} \dots 10^{13}$ н/см²·с. Величина флюенса нейтронов при облучении образцов варьировалась в пределах примерно $1.10^{19} \dots 2.10^{20}$ н/см², а температура облучения составляла $\sim 285 \pm 10^\circ\text{C}$, что практически совпадает с температурой, характерной для работы КР ВВЭР-1000.

Изменение в результате облучения склонности материалов к хрупкому разрушению оценивали по повышению температуры вязко-хрупкого перехода, определяемой при испытании на ударный изгиб стандартных образцов сечением 10x10 мм. Темпера-

туру вязко-хрупкого перехода определяли в основном по уровню поглощенной энергии разрушения 47 Дж, а в ряде случаев по количеству (50%) вязкой составляющей в изломе образцов. Температурные зависимости энергии разрушения и волокна в изломе были построены на основании математической модели с использованием функции гиперболического тангенса. Полученные данные по смещению температуры вязко-хрупкого перехода ΔT были использованы для анализа дозовой зависимости радиационного охрупчивания трех групп материалов – основного металла стали 15X2НМФА-А и металла ее сварных швов с содержанием никеля в одном случае до 1,36%, а в другом – 1,65...1,80%.

Результаты охрупчивания стали 15X2НМФА-А под облучением в зависимости от величины флюенса представлены на рис.6,а. На этом же рисунке приведена нормативная зависимость :

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

где F – величина флюенса с $E \geq 0,5$ Мэв в единицах 10^{18} н/см^2 , а A_F – коэффициент РО, равный 23. Из этого рисунка видно, что нормативная зависимость (1) является достаточно консервативной в интервале значений флюенса до $6 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$.

Зависимость РО металла сварных швов с содержанием Ni не более 1,36% приведена на рис.6,б. Как видно из этого рисунка при величине флюенса до $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$ все экспериментальные значения ΔT лежат ниже нормативной зависимости (1) с коэффициентом $A_F=20$.

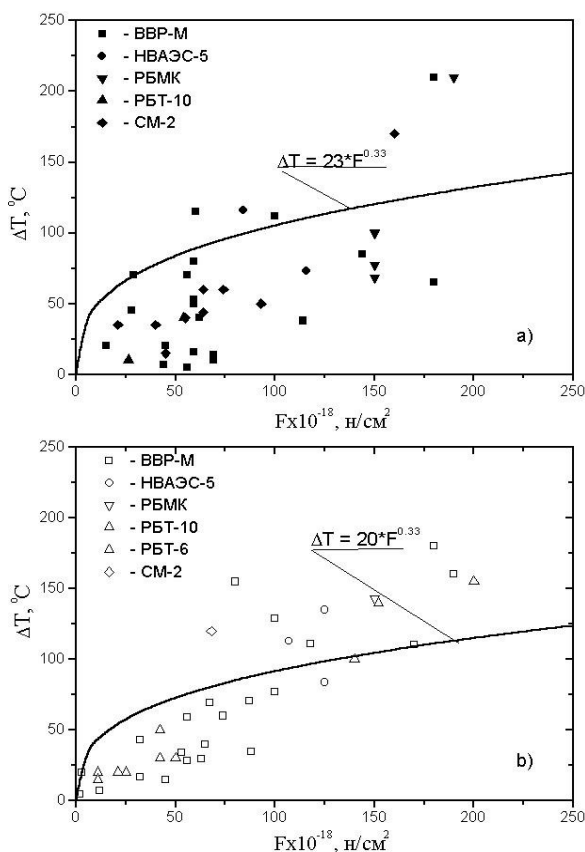


Рис. 6. Дозовая зависимость радиационного охрупчивания стали 15X2HMFA-A (a) и металла ее сварных швов с содержанием 0,96...1,36% Ni (b)

При более высоких значениях флюенса (от $\sim 6 \cdot 10^{19}$ до 1.10^{20} н/см^2) часть точек расположена уже выше нормативной кривой. Начиная с флюенса $\sim 1.10^{20} \text{ н/см}^2$, практически все значения ΔT превышают сдвиги, определяемые по нормативной зависимости $\Delta T(F)$ с коэффициентом $A_F=20$.

Эти данные, полученные после высокопоточного облучения, целесообразно сопоставить с экспериментальными данными [10] по образцам-свидетелям при плотности нейтронного потока $\sim 10^{10} \dots 10^{11} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ (флюенс $\sim 1,99 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$). На рис.7 сопоставляются с нормативной кривой при $A_F=23$ данные о РО образцов-свидетелей из основного металла с 1,21% Ni (КР НВ АЭС), 1,16% Ni (КР первых блоков Калининской и Балаковской АЭС) и 1,17% Ni (КР ЮУ АЭС), а также ОС из металла сварного шва с 1,21% (КР НВ АЭС). Видно, что практически

все экспериментальные точки расположены ниже указанной нормативной зависимости. Представленные результаты, с одной стороны свидетельствуют о том, что использование нормативной зависимости вполне оправдано в практических целях, и с другой, данные по ОС не противоречат результатам исследований РО после ускоренного (высокопоточного) облучения.

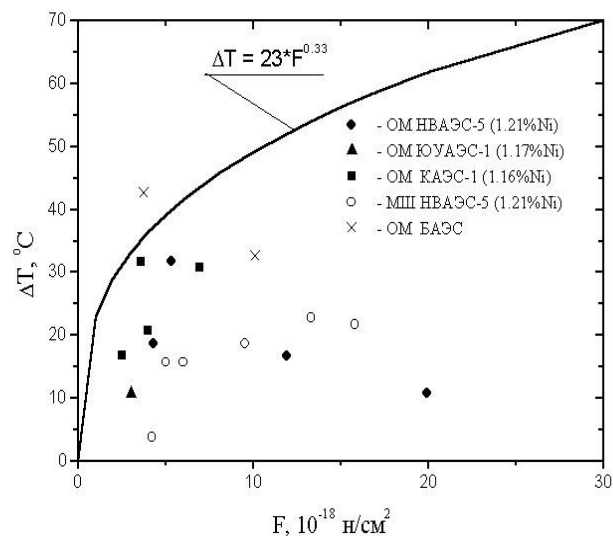


Рис. 7. Сопоставление данных о радиационном охрупчивании стали 15X2HMFAA с 1.16-1.21%Ni, полученных на образцах-свидетелях КР ВВЭР-1000, с нормативной зависимостью.

Для металла сварных швов с концентрацией Ni $\sim 1,6 \dots 1,8\%$ результаты исследований приведены на рис.8. Из него видно, что в изученном интервале доз лишь четыре экспериментальные точки расположены ниже нормативной зависимости $\Delta T(F)$ с коэффициентом $A_F=20$. Начиная от величины флюенса $\sim 2 \cdot 10^{19}$ и до 1.10^{20} н/см^2 , все экспериментально найденные величины ΔT лежат выше нормативной кривой. Таким образом, для металла сварных швов с повышенным (1,6...1,8%) содержанием никеля при флюенсах выше $\sim 2 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$ зависимость $\Delta T=20 F^{1/3}$ является определенно неконсервативной. Подтверждением этому служат и результаты [10] исследования образцов-свидетелей металла сварных швов с повышенным содержанием Ni, (см. рис.9). В результате совокупного рассмотрения данных как по ОС, так и данных, полученных при ускоренном облучении, можно с уверенностью утверждать, что для прогноза РО металла сварных швов с повышенным содержанием никеля требуется корректировка дозовой зависимости $\Delta T(F)$.

Имеющиеся данные позволяют (с учетом методических допущений) оценить влияние Mn на радиационное охрупчивание металла исследованных швов с повышенным содержанием Ni. Допущения связаны с необходимостью сравнивать результаты испытаний образцов, облученных не в одной сборке при наиболее близких условиях облучения, а в различных сборках, да еще и в разных реакторах. Тем не менее удалось сделать подборку данных, когда

величина флюенса для сравниваемых материалов составила $(4,6 \dots 0,8) \cdot 10^{19}$ н/см².

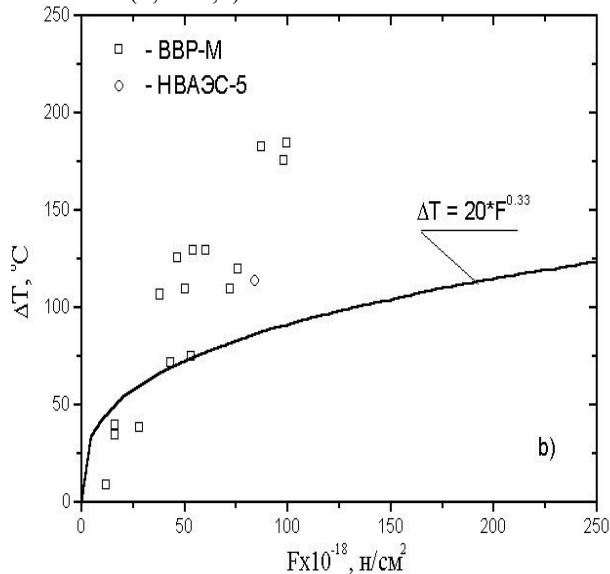


Рис. 8. Дозовая зависимость радиационного охрупчивания металла сварных швов стали 15X2HMΦA-A с содержанием 1,65...1,8 % Ni

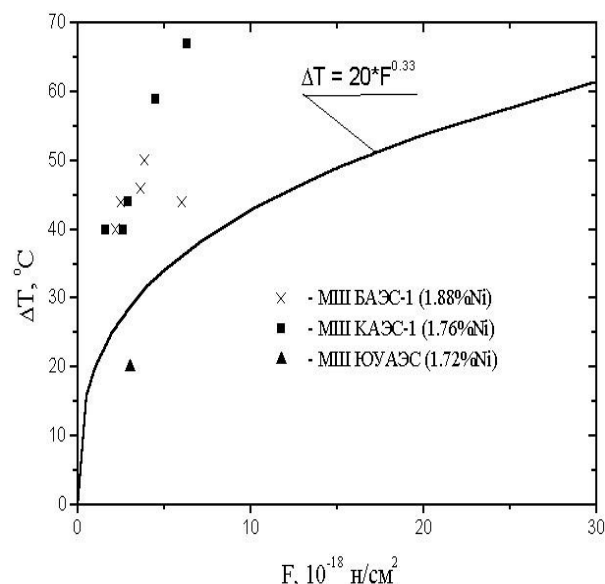


Рис. 9. Сопоставление данных о радиационном охрупчивании металла сварных швов с 1.72...1.88% Ni, полученных на образцах-свидетелях КР ВВЭР-1000, с нормативной зависимостью

При таком допущении удастся, по крайней мере качественно, оценить влияние Mn на радиационное охрупчивание сварных швов (см. рис.10). Из рисунка видно, что с ростом в металле швов суммарного содержания Mn и Ni от ~2,09 до 2,84% наблюдается усиление РО материалов. Этот рост, с учетом узкого диапазона изменения содержания Ni (1,65...1,8%), обусловлен повышением концентрации Mn. Темные точки на этом же рисунке лежат ниже и характеризуют радиационное охрупчивание металла швов, в которых суммарное содержание Ni и Mn также около 2%, но концентрация Ni заметно ниже, чем в случае светлых точек, и составляет ~1,1%. Поэтому правомочно рассмотреть зависимость РО

металла швов от соотношения Ni/Mn (см. рис.11). Из рис. 10 и 11 следует, что с ростом соотношения Ni/Mn наблюдается усиление РО, т.е. Ni превалирует над Mn при их совместном влиянии на охрупчивание металла сварных швов под облучением, по крайней мере в рассмотренном диапазоне изменений их концентрации. Естественно, затронутый вопрос требует своего более тщательного в методическом отношении изучения при варьировании содержания Ni и Mn в более широком диапазоне.

1.

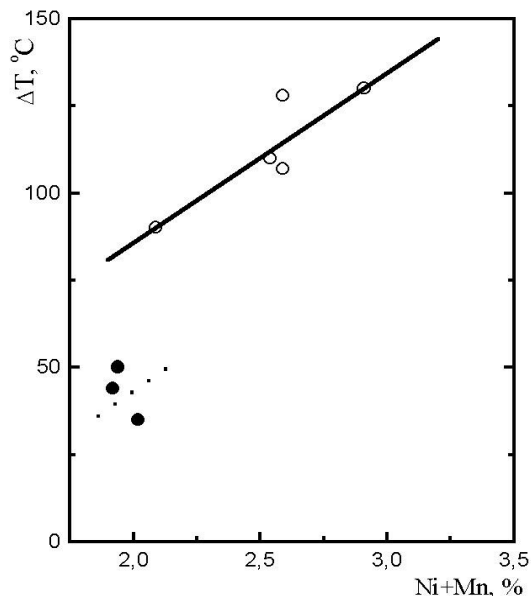


Рис.10. Влияние суммарного содержания Ni+Mn на повышение температуры вязко-хрупкого перехода металла сварных швов стали 15X2HMΦA-A после облучения при температуре $295 \pm 15^\circ\text{C}$ флюенсом $(4,6 \pm 0,8) \cdot 10^{19}$ н/см² с $E \geq 0,5$ Мэв. O - 1.70...1.77% Ni; ● - 1.10...1.13% Ni

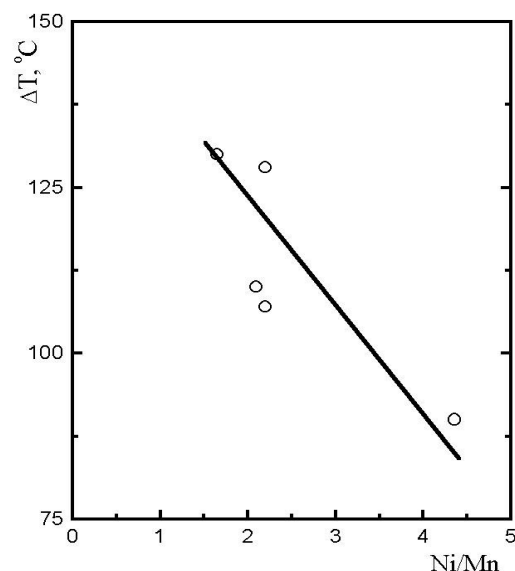


Рис.11. Сдвиг температуры вязко-хрупкого перехода в результате облучения при температуре $\sim 290 \pm 15^\circ\text{C}$ флюенсом $(4,6 \pm 0,8) \cdot 10^{19}$ н/см² с $E \geq 0,5$ Мэв в функции от соотношения Ni/Mn для металла сварных швов стали 15X2HMΦA-A

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа данных по радиационному охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 можно сделать следующие предварительные выводы.

1. Для стали 15Х2НМФА-А и металла ее сварных швов с содержанием никеля не более ~1,3% нормативное соотношение $\Delta T = A_F F^{1/3}$ является достаточно консервативным в расчетных оценках РО вплоть до значений флюенса, близких к характерным для КР ВВЭР-1000 (флюенс до $\sim 6 \cdot 10^{19}$ н/см²).

2. Для металла сварных швов с содержанием никеля более 1,6% применение нормативного соотношения для оценки величины ΔT (F) неправомерно из-за его неадекватности и недостаточной консервативности в интервале проектных для КР ВВЭР-1000 значений флюенса нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Николаев, В.И.Баданин /В Сб. «Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования». II Всесоюзное совещание. Киев, «Наукова думка», 1977, с.75-85.
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. U.Potapovs, J.R.Hawthorne //Nucl. Applic., 1969, v.6, p.27-46.
4. В.А.Николаев, В.И.Баданин // Атомная энергия, 1974, т.37, вып.6, с.491-493.
5. В.А.Николаев, А.М.Морозов, В.И.Баданин и др. Влияние химического состава и режима отпуска на радиационное охрупчивание металла низколегированных сварных швов. //Атомная энергия. 1984, том 57, вып.№3, с.167-172.
6. Е.Д.Теплова, Н.С.Теплов, Е.А.Мироненко //Металловедение, №3, Судпромгиз, 1959, с.39-50.
7. N.N.Alekseenko, A.D.Amaev, I.V.Gorynin, V.A.Nikolaev Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels// Am. Nucl. Soc., La Grange, Park, Illinois USA, 1977.
8. В.А.Николаев.// Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 1980, т.2, (13), с.47-60.
9. В.А.Николаев, О.Н.Жуков, С.В.Шаповалов //Физика металлов и металловедение. 1989, т.68, №3, с.578-581.
10. Отчет. Evaluation of irradiation embrittlement of Russian WWR-1000 reactor pressure vessel beltline steels. Espoo. November 1996.