

Анализ низкопоточного и низкотемпературного охрупчивания углеродистых сталей в составе конструкций реакторов АЭС

С.С. Ломакин

ведущий научный сотрудник НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, канд.техн.наук

В экспертных оценках НТЦ ЯРБ документов по хрупкой прочности опорных конструкций реакторов автором неоднократно указывалось на необходимость учета низкопоточного охрупчивания.

Настоящая работа выполнена для демонстрации проблемы и дает практический рецепт оценки величин обсуждаемых эффектов, актуальность которых в связи с продлением срока службы реакторов АЭС трудно переоценить.

В опорных конструкциях реакторов используются малоуглеродистые стали обыкновенного качества (в реакторах ВВЭР) или слаболегированные, которые эксплуатируются в условиях невысоких флюенсов, плотностей потока нейтронов и температур.

К данному моменту эти конструкции выдерживают проектный срок службы, обоснованный более 30 лет назад, без учета названных эффектов, по которым в период проектирования и ввода в эксплуатацию результатов практически не имелось.

В 1986 г., уже после ввода в эксплуатацию первых реакторов ВВЭР и ВВР за рубежом, были получены данные на реакторе HFIR [1] с образцами-свидетелями из малоуглеродистых сталей, которые показали существенно большую степень радиационного охрупчивания по сравнению с прогнозом, выполненным по результатам исследования тех же сталей на реакторе MTR с плотностью потока быстрых нейтронов (флакса) на 3 – 4 порядка выше по сравнению с HFIR.

Обозначенная проблема, получившая название “проблема флакса, или низкопоточного охрупчивания”, за рубежом решалась применительно к американским сталям опорных конструкций в водо-водяных и корабельных реакторах. При этом диапазон различия примесей, температур и других обстоятельств, существенно влияющих на охрупчивание, оказался весьма значителен, что приводило порой к трудносопоставимым результатам.

Для опорных конструкций реакторов отечественных АЭС эту проблему влияния низкой плотности потока нейтронов (флакса) на охрупчивание до сих пор в количественном отношении также нельзя считать вполне разрешенной.

О наличии заметного влияния на величину радиационного охрупчивания сталей потока нейтронов низкой плотности свидетельствуют измерения сдвига ΔT_F корпусной стали одной и той же марки, облученной в позиции образцов-свидетелей реакторов ВВЭР-440 (213). При разнице в плотностях потоков нейтронов на порядок при одинаковых флюенсах различие в ΔT_F составило примерно 40% [2].

В настоящее время в связи с выявлением возможности продления срока службы первых АЭС степень охрупчивания материалов опор под действием нейтронного облучения должна быть дополнительно оценена с учетом эффектов низкопоточного и низкотемпературного охрупчивания. Без этого не может быть обоснована безопасность эксплуатации реакторов при продлении срока службы конструкций сверх проектной величины.

Оценка эффекта низкопоточного охрупчивания и сейчас затруднительна из-за недостатка экспериментальных данных. Набор флюенса нейтронов на образцах металла опор при малых плотностях потока нейтронов требует весьма длительных по времени облучений образцов. По этой причине для сокращения времени возможен подход, основанный на сборе и анализе экспериментальных данных по условиям облучения образцов и на их статистической обработке.

Ввиду отсутствия для сталей марки Ст3 и 22К исчерпывающих данных по охрупчиванию, в частности, сдвига критической температуры хрупкости, была сформирована аналоговая группа сталей, близких по химсоставу и свойствам к используемым в составе металлоконструкций и опор реакторов, и по которым имеется та или иная информация о необходимых для настоящего анализа свойствах.

В аналоговую группу включены стали следующих марок: Ст3, 22К (Россия), 13030 (Чехия), А106, А212В (США).

По химсоставу, зернистости и свойствам наилучшим аналогом стали марки Ст3 является сталь марки А106 (табл. 1), для стали 22К – сталь 13030.

Таблица 1

Свойства стали А106

Марка стали	Условия облучения		Температура перехода в хрупкое состояние	
	Флюенс нейтронов $E > 1 \text{ МэВ}$, 10^{19} н/см^2	Температура, °С	T_k , °С	Изменение, °С
А106 Мелкозернистая [3]			-60	
	0,5	<93	-15	45
	5	<93		47
	8	<93		139
	10	<93	75	135
	0,5	316	-40	20

Собранные данные по сталям аналоговой группы использовались для установления зависимости сдвига критической температуры хрупкости ΔT_k от плотности потока нейтронов ϕ при постоянном флюенсе нейтронов и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание элементов примесей в углеродистых сталях

Марка стали	Содержание элементов, %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие
Ст3 сп	0,14±0,22	0,12±0,30	0,40±0,65	<0,3	<0,3	P<0,05 S<0,05 Cu<0,3
A106	0,24	0,20	0,72			P≤0,018 S≤0,023
22K	0,18±0,26	0,17±0,37	0,70±0,90	0,2	0,2	P≤0,045 S≤0,045 Cu=0,14
ЧСН 13030	0,16±0,24	0,27	0,8	0,03±0,13	0,01±0,21	S=0,02 P=0,02 Mo=0,04
A 212B	0,26	0,22±0,24	0,76±0,80		0,22±0,28	S=0,031±0,036 P=0,011±0,012 Mo=0,02

Имеющиеся данные по сдвигу критической температуры хрупкости ΔT_k для разных температур облучения стали A212B [3] вместе с аналогичными данными для стали A106 использованы для получения зависимости ΔT_k от температуры облучения.

Величина так называемого эффекта низкпоточного охрупчивания имеет весьма важное значение при оценке охрупчивания стали в условиях низких значений плотности потока нейтронов (флакса), в частности, соответствующих условиям эксплуатации опорных конструкций реакторов ВВЭР-440 ($F = 10^{18} - 10^{19}$ н/см² и $\phi = 10^9 \div 10^{10}$ н/см²·с) [6].

При использовании данных из опубликованных источников (табл. 3) была проведена статистическая обработка экспериментально определенных сдвигов критической температуры хрупкости в зависимости от флакса нейтронов ϕ для сталей аналоговой группы. Полученная зависимость имеет вид $\Delta T_F = a - b \lg \phi$.

Для флюенса нейтронов с энергиями >0,5 МэВ и $F = 10^{19}$ н/см² $\Delta T_F = 84,7 - 2,76 \lg \phi$ (рис. 1). Погрешность, соответствующая 95%-ному доверительному уровню, составила 10-15% для ϕ в интервале $10^{12} - 10^{13}$ н/см². (Статистическая обработка данных выполнена В.М. Душкевичем по разработанной им программе.)

Таблица 3

Измеренный сдвиг критической температуры хрупкости ΔT_F , приведенный к величине $F=10^{19}$ н/см²

№ п/п	Марка стали	Реактор испытаний	Плотность потока нейтронов (флакс), н/см ² ·с, E>0,5 МэВ	ΔT_F , °C	Номер ссылки
1	A212B	HFIR	$2,8 \cdot 10^8$	125*)	[1]
2	Ст3	ИР	Данные не приведены	56	[4]
3	Ст3	ИР	Данные не приведены	95	[4]
4	22K	ВВР-С	$5,6 \cdot 10^{12}$	39	[7]
5	13030	ВВР-С	$5,6 \cdot 10^{12}$	50	[7]
6	A106	ORR	$1,4 \cdot 10^{13}$	25	[5]
7	A106	ORR	$1,4 \cdot 10^{13}$	48	[5]
8	A106	ORR	$1,4 \cdot 10^{13}$	50	[5]
9	A106	ORR	$1,4 \cdot 10^{13}$	51	[5]
10	A212B	ORR	$1,4 \cdot 10^{13}$	56	[5]
11	A212B	ORR	$1,4 \cdot 10^{13}$	62	[5]
12	22K	РФТ	$5,1 \cdot 10^{13}$	49	[8]
13	13030	РФТ	$5,1 \cdot 10^{13}$	65	[8]
14	22K	СМ	$2,8 \cdot 10^{14}$	33	[9]

*) Вследствие большой величины потока тепловых нейтронов данные по HFIR в анализе не рассматривались.

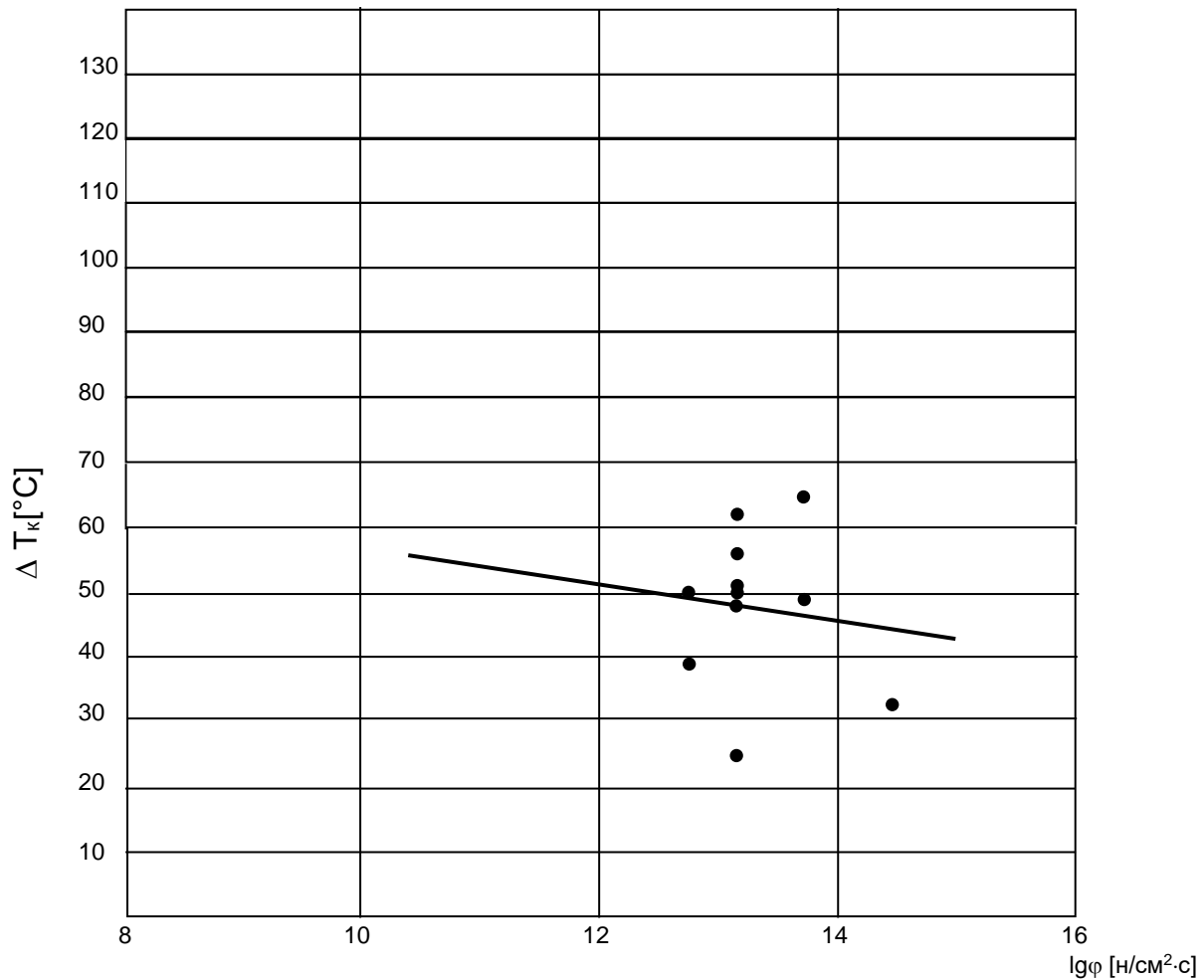


Рис.1. Зависимость ΔT_k сталей аналоговой группы от флюенса нейтронов:
 точки – экспериментальные величины ΔT_k ;
 треугольник – экспериментальная величина ΔT_k (реактор HFIR)

Зависимость сдвига критической температуры хрупкости для оценки низкотемпературного охрупчивания приведена на рис. 2 для $F = 5 \cdot 10^{18}$ н/см². Используются данные о сталях марок А106 и А212В. Полученная линия регрессии и 95%-ный уровень доверительной вероятности $\Delta T_k(t_{обл}) = (2,7 - 0,054 t_{обл})$ рекомендуются для сталей аналоговой группы в диапазоне флюенса нейтронов, характерном для опорных конструкций и металлоконструкций реакторов АЭС.

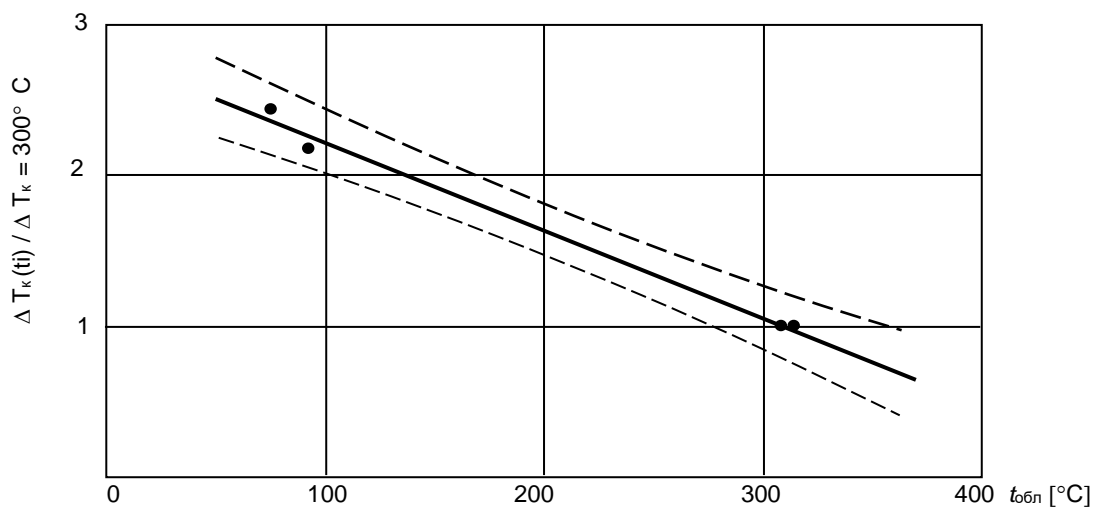


Рис.2. Зависимость $\Delta T_{ki}(t_{обл}) / \Delta T_k(t = 300^\circ\text{C})$ для стали марки СтЗ от температуры облучения (пунктир – границы 95%-ного доверительного интервала, точки – экспериментальные величины)

Установленные в данном анализе зависимости позволяют оценить сдвиг ΔT_k с учетом низкоточного и низкотемпературного охрупчивания.

Для сталей марки Ст3 и 22К рост сдвига ΔT_k существенен и приводит к его увеличению (относительно проекта) примерно на 30-50% при использовании указанных сталей в составе опор реакторов АЭС.

При обосновании безопасности эксплуатации опор и металлоконструкций в течение продлеваемого срока службы эффект низкоточного и низкотемпературного охрупчивания должен быть достоверно оценен и отражен в величине критической температуры хрупкости, используемой при соответствующем расчете хрупкой прочности конструкции.

Литература

1. R.K. Nanstad, K. Farrell, D.N. Braski, W.R. Corvin. Accelerated neutron embrittlement of ferritic steels at low fluence flux and spectrum effects. – J. of Nucl. Mat., 158 (1988), 1-6.
2. Reactor pressure vessel embrittlement, IAEA-TECDOC-659, 1992 г.
3. Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем // Под ред. Дж. Ф. Кирхера. Пер. с англ., Атомиздат, 1967.
4. Бурдаков Н.С., Васнин А.М., Ослин С.Г. и др. Исследование влияния облучения на прочностные характеристики материалов металлоконструкций реакторов. // Атомная энергия, 1990. -Т. 69. -Вып. 3. -С. 135-139.
5. Вильсон Дж. В кн.: "Труды второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии". Женева, 1958. Избранные доклады иностранных ученых. -Т6. -М.: Атомиздат. 1959. С.391.
6. С.С. Ломакин и др. Экспериментальные данные о нейтронных полях в ВВЭР-440 // Атомная энергия, 1980. -Т.49. - Вып. 1.
7. М. Брумовский, М. Вацек. Влияние легирующих элементов на радиационную стойкость сплавов железа и малолегированных сталей. // Труды конференции по реакторному материаловедению. Алушта, 1978. -С. 255–279.
8. Н.Ф. Правдюк и др. Влияние нейтронного облучения на свойства конструкционных материалов. // В сб. Действие ядерных излучений на материалы. М.: 1962.
9. В.А. Цыканов, Б.В. Самсонов. Техника облучения материалов в реакторах с высоким нейтронным потоком. М.: Атомиздат. 1973.