

# РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

## МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 621.039.531

### СРАВНЕНИЕ РОССИЙСКИХ И ФРАНЦУЗСКИХ НОРМАТИВНЫХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЦИОННОГО ОХРУПЧИВАНИЯ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

*В.Н. Голованов, Д.В. Козлов, В.И. Прохоров, В.М. Раецкий,  
В.К. Шамардин, В.А. Красноселов  
ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Россия;  
Ж.П. Массу, К. Тролля, Р. Берtrand  
EdF, г. Фонтенеро, Франция*

Приводятся результаты эксперимента по сравнению российских и французских нормативных методик определения радиационного охрупчивания корпусных сталей.

#### ВВЕДЕНИЕ

Целью работы была оценка влияния методики вырезки образцов (включающей в себя ориентацию продольной оси образца, ориентацию надреза, место вырезки образца и т.д.) и методики определения  $T_k$  (критической температуры хрупкости) на величину  $\Delta T_F$  (сдвиг критической температуры хрупкости после облучения).

Сравнивались методики, включенные в действующие Национальные коды России и Франции: ПНАЭ-Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок», ГОСТ 6996-66, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78; RCC-M «Правила проектирования и изготовления механических компонентов атомных электростанций с реакторами с водой под давлением», MS 1000, MS 1220, S1 331.

Для проведения эксперимента из 4-го блока Калининской АЭС (ВВЭР-1000/320) были отобраны металлы обечайки и сварного шва № 4, находящиеся в самой радиационно-нагруженной части корпуса. Облучение образцов проводилось при температуре 290 °С до флюенса  $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$  ( $E > 0,5 \text{ МэВ}$ ), что соответствует рабочей температуре и флюенсу на конец тридцатилетнего срока эксплуатации для ВВЭР-1000.

Изменение свойств под действием облучения определялось по результатам испытаний на ударный изгиб и одноосное растяжение. Была проведена оценка свойств основного металла, металла сварно-

го шва и зоны термического влияния по российской и французской методикам.

Исследования проводились в рамках проекта KL2007 «Сравнение нормативных кодов по проектированию и изготовлению корпусов реакторов с водой под давлением».

#### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Для изготовления образцов и проведения исследований в ГНЦ РФ НИИАР был передан блок размером 1000×1500 мм (рис. 1), представляющий собой участок сварного шва № 4 (это ближайший к АЗ сварной шов) и прилегающие к нему участки обечайки.

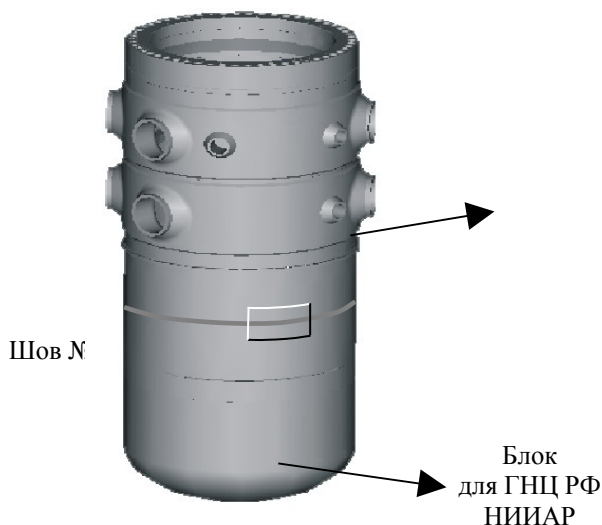


Рис. 1. Корпус 4-го блока Калининской АЭС (ВВЭР-1000/320).

Расположение блока металла, переданного в НИИАР для изготовления образцов

В табл. 1 приведено содержание основных легирующих и примесных элементов в сварном шве и верхней обечайке, из которой изготавливались образцы основного металла, в табл. 2 – режимы термообработки основного металла и металла сварного шва.

Таблица 1

Химический состав исследуемых материалов

	Содержание элементов, мас.%													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P	Co	Sb	Sn	As
Основной металл	0,17	0,24	0,50	1,93	1,28	0,52	0,08	0,05	0,012	0,009	0,002	0,0019	0,0019	0,002
Сварной шов	0,08	0,34	0,69	1,90	1,52	0,69	-	0,07	0,014	0,01	-	-	-	-

Таблица 2

Режимы термической обработки основного металла и металла сварного шва

Тип металла	Вид термической обработки	Температура термической обработки, °С	Скорость нагрева, °С/ч	Время выдержки	Характер охлаждения
Основной металл	Изотермический отжиг с закалкой	910...920	М/п	8 ч	С печью до 700 °С
		680...700		36 ч 20 мин	
		900...915	30	8 ч	В воде до температуры 100 °С на поверхности детали
	Отпуск	650...660	М/п	17ч 40мин	На воздухе
	Отпуск	610...630	8	4 ч 40 мин	С печью до 400 °С Далее на воздухе
	Отпуск	610...622	5,5	4 ч 50 мин	С печью до 400 °С Далее на воздухе
	Отпуск	640...660	8	8 ч 30 мин	С печью до 300 °С со скоростью 7 °С/ч Далее на воздухе
Сварной шов	Отпуск	610...630	8	4 ч 40 мин	С печью до 400 °С Далее на воздухе
	Отпуск	610...622	5,5	4 ч 50 мин	С печью до 400 °С Далее на воздухе
	Отпуск	640...660	8	8 ч 30 мин	С печью до 300 °С со скоростью 7 °С/ч Далее на воздухе

Для сравнения методик определения критической температуры хрупкости и вырезки образцов были изготовлены следующие типы образцов Шарпи:

- образцы основного металла, изготовленные в соответствии с требованиями российской и французской документаций;
- образцы металла сварного шва, изготовленные в соответствии с требованиями российской и французской документаций;
- образцы зоны термического влияния, изготовленные по российской методике.

Образцы для испытания на растяжение были изготовлены из основного металла и металла сварного шва по единой технологии (без разделения на «русские» и «французские»). Ниже дано краткое описание каждого типа образцов.

- 1 – образцы типа Шарпи из основного металла, вырезанные в соответствии с требованиями RCC-M MC 1000, MC 1220, S1 331, на расстоянии 23 мм от внутренней поверхности обечайки (слой металла соответствует 1/4 толщины поковки, прошедшей основную термообработку). Ориентация образцов осевая, ориентация надреза радиальная. Ориентация трещины Lθ;<sup>1</sup>
- 2 – образцы типа Шарпи из металла сварного шва, вырезанные в соответствии с требованиями RCC-M MC 1000, MC 1220, S1 331. Ориентация образцов осевая, ориентация надрезов радиальная. Образцы изготовлены из наружной части

<sup>1</sup> Каждый тип ударных образцов можно охарактеризовать вектором нормали к плоскости распространения трещины и вектором направления движения фронта трещины. Здесь приняты следующие обозначения: L – вектор параллельный образующей обечайки, R – вектор параллельный радиусу, θ – вектор параллельный касательной к окружности обечайки.

- сварного шва, расстояние от поверхности образцов до поверхности обечайки составляет 20, 35, 50, 65, 80 и 95 мм. Ориентация трещины  $L\theta$ ;
- 3 – образцы типа Шарпи из основного металла, вырезанные в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78. Ориентация образцов тангенциальная (по окружности обечайки), ориентация надрезов радиальная. Ориентация трещины  $\theta L$ ;
  - 4 – образцы для испытаний на растяжение из основного металла, вырезанные в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84. Продольная ось образцов расположена тангенциально;
  - 5 – образцы типа Шарпи из металла сварного шва, вырезанные в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66, имеют осевую ориентацию, над-

рез расположен тангенциально. Ориентация трещины  $LR$ ;

- 6 – образцы для испытаний на растяжение из металла сварного шва, вырезанные в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66. Продольная ось образцов имеет осевую ориентацию;
- 7 – образец типа Шарпи из металла зоны термического влияния, вырезанный в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66. Образцы зоны термического влияния изготовлены таким образом, что ось надреза находится на расстоянии 0,3...0,5 мм от линии сплавления металла шва и основного металла. Ось надреза располагается в основном металле. Ориентация образцов осевая, ориентация надреза тангенциальная. Ориентация трещины  $LR$ .

На рис. 2 приведена схема вырезки из блока.

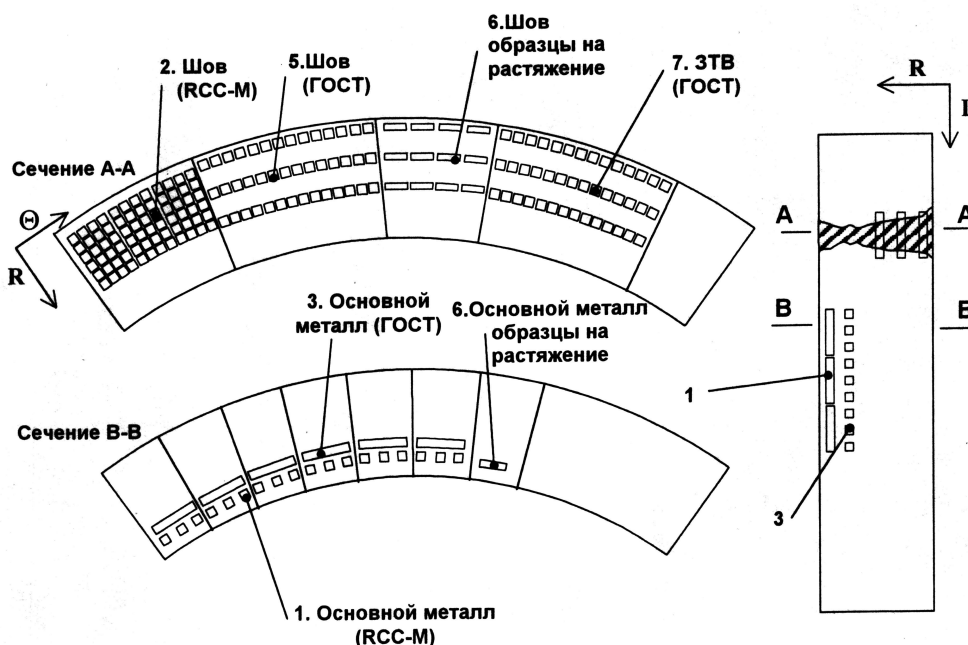


Рис. 2. Схема вырезки образцов для механических испытаний по российским и французским нормам

Изготовлено пять комплектов ударных образцов. Для испытаний в облученном и исходном состояниях каждый комплект был разделен на партии по 21-24 образца. С целью уменьшения погрешностей при определении  $T_k$ , связанных с разбросом свойств в объеме металла, образцы для испытаний в исходном и облученном состоянии выбирались «через один».

### ОБЛУЧЕНИЕ

Облучение образцов проводилось в стенде «Корпус» на исследовательском реакторе РБТ-6 (г. Дмитровград, НИИАР). Возможности стенда позволяют облучать большое количество образцов в хорошо поддерживаемых и контролируемых условиях. Эти условия близки к условиям работы корпусов реакторов с водой под давлением по температурным и нейтронно-физическим параметрам.

Образцы облучались с сентября 1999 г. по февраль 2000 г. (срок облучения 164 дня), при температуре 290 °С. Температура облучения в рабочем сечении каждого образца вычислялась по показаниям шестнадцати термопар, расположенных в облучаемом блоке образцов. Флюенс нейтронов определялся по результатам измерений нейтронно-активационных детекторов, которые были помещены в ампулу с образцами. Среднее значение флюенса быстрых нейтронов ( $E > 0,5$  МэВ) для всего массива образцов  $6,2 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup>, отклонение частных значений флюенса от среднего (для каждого образца) не превышает 7 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Образцы для испытаний на растяжение были вырезаны из основного металла и металла сварного шва. Ориентация продольной оси образцов основного металла тангенциальная, а образцов сварного шва осевая. Механические свойства, определенные при температурах 20 и 350 °С в необлученном и облученном состояниях, приведены в табл. 3 и 4.

Облучение вызвало прирост пределов текучести и прочности. Для образцов основного металла прирост  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_e$  составил 40...50 МПа и при 20 и при 350 °С, для образцов сварного шва прирост этих величин больше и составляет 80...100 МПа.

Таблица 3

**Результаты испытаний на растяжение образцов основного металла до и после облучения**

Маркировка образцов	Температура испытаний, °С	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Равномерное относительное удлинение, %	Общее относительное удлинение, %
Необлученные					
4-8	350	505	575	4,9	17,7
4-6	350	510	585	4,8	17,8
4-4	20	585	690	7,3	22,0
4-2	20	575	685	7,2	21,3
Облученные					
7-4	350	555	645	5,9	16,9
3-4	350	535	625	5,3	16,4
1-4	20	620	730	9,9	22,0
5-4	20	625	735	8,6	20,5

Таблица 4

**Результаты испытаний на растяжение образцов из металла сварного шва до и после облучения**

Маркировка образцов	Температура испытаний, °С	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Равномерное относительное удлинение, %	Общее относительное удлинение, %
Необлученные					
L-B	350	440	510	7,9	18,1
K-B	350	465	520	7,1	18,5
K-B	20	540	615	11,4	24,7
L-B	20	525	630	10,8	24,3
Облученные					
L-C	350	525	600	6,5	16,3
K-C	350	545	600	5,9	15,9
L-C	20	640	715	10,6	22,7
K-C	20	615	680	9,8	20,9

Нужно отметить, что прочность металла сварного шва в исходном состоянии менее 549 МПа, и по требованиям ПНАЭ Г-7-002-86 [2] критериальное значение ударной вязкости при определении  $T_k$  равно 49 Дж/см<sup>2</sup>. Равномерное и общее удлинение после облучения либо не изменилось, либо изменилось незначительно (на 1...3%).

**РЕЗУЛЬТАТЫ УДАРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

В табл. 5 приведены критические температуры хрупкости, определенные по критериальному значению ударной вязкости 6 кгм/см<sup>2</sup> (59 Дж/см<sup>2</sup>), и ударная вязкость на уровне верхнего шельфа для каждого типа образцов.

Таблица 5

**Свойства металла корпуса ВВЭР-1000 до и после облучения при различных способах вырезки образцов**

Тип образцов	$T_{к0}$ , °С	$T_{кF}$ , °С	$\Delta T_F$ , °С	Ударная вязкость в области верхнего шельфа, Дж/см <sup>2</sup>	
				необлученные	облученные
Основной металл (RCC-M)	-12	26	38	165	120
Металл сварного шва (RCC-M)	-20	38	58	175	150
Основной металл (ГОСТ)	-63	-32	31	255	210
Металл сварного шва (ГОСТ)	-30	24	54	175	155
Металл зоны термического влияния (ГОСТ)	-59	-29	30	225	185

Для всех типов образцов влияние облучения качественно одинаково. Оно заключается в сдвиге температуры хрупко-вязкого перехода в область более высоких температур и в понижении максимальных значений ударной вязкости на верхнем шельфе температурной зависимости, но для каждого типа

образцов исходные значения и количественные изменения указанных характеристик различны.

В табл. 6 приведены значения критических температур хрупкости и их сдвиги, определенные по этим зависимостям.

Таблица

6

**Критические температуры хрупкости, определенные по величине ударной вязкости и по доле вязкого составляющей в изломе**

Тип образцов	$T_{к0}, ^\circ\text{C}$	$T_{50}, ^\circ\text{C}$	$T_{кF_0}, ^\circ\text{C}$	$T_{F50}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{F_0}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{F50}, ^\circ\text{C}$
Основной металл (RCC-M)	-12	-4	26	29	38	33
Металл сварного шва (RCC-M)	-20	-1	38	41	58	42
Основной металл (ГОСТ)	-63	-19	-32	11	31	30
Металл сварного шва (ГОСТ)	-30	0	24	45	54	45
Металл зоны термического влияния (ГОСТ)	-59	-41	-29	-8	30	3

Примечание:  $T_{50}, T_{F50}$  – температура хрупкости, определенная по доле вязкой составляющей в необлученном и облученном состоянии;  $\Delta T_{F50}$  – сдвиг после облучения

На рис. 3, 4 показаны зависимости ударной вязкости и доли вязкого излома от температуры испытаний, для каждого типа образцов до и после облучения.

Эти данные являются основным результатом проведенной работы по определению влияния способа вырезки образцов и методики определения критической температуры хрупкости на получаемые свойства различных зон корпуса ВВЭР-1000.

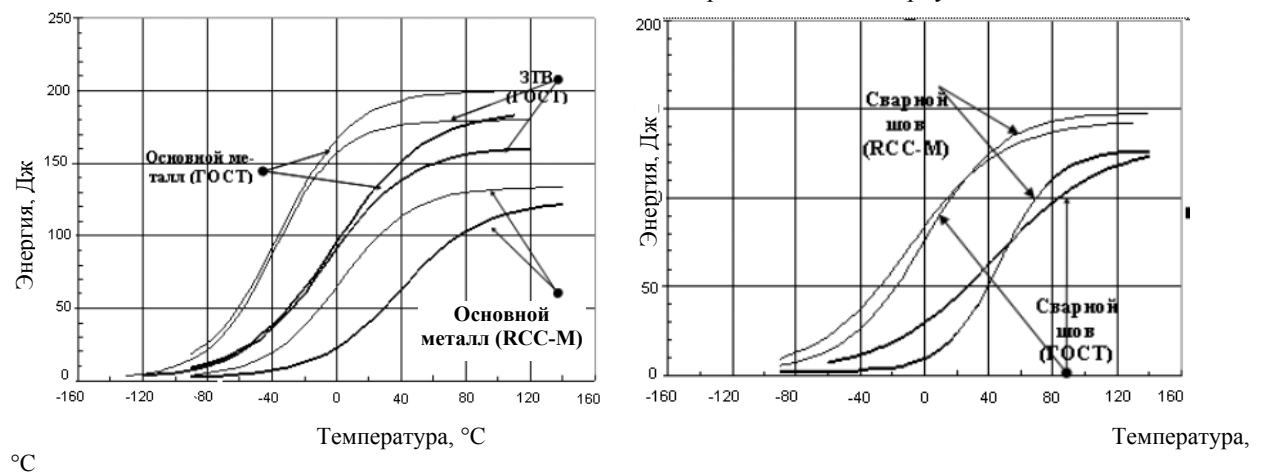


Рис. 3. Температурные зависимости ударной вязкости для основного металла, сварного шва и ЗТВ (— необлученный, — облученный)

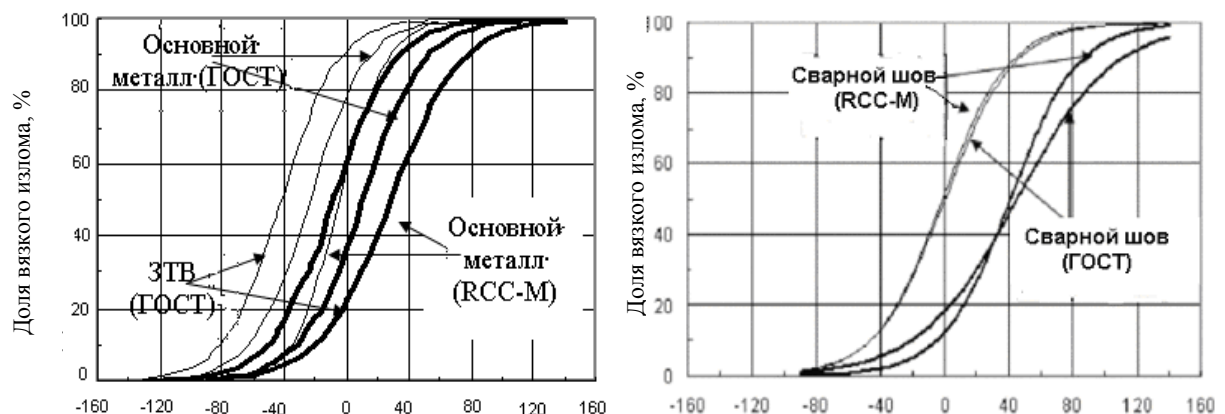


Рис. 4. Температурные зависимости доли вязкого излома для каждого типа образцов ( — необлученный  
 — облученный)

Ниже приводится сравнение полученных характеристик в зависимости от типа образцов, которые можно условно разделить на три группы:

1). Образцы основного металла и зоны термического влияния, изготовленные по требованиям ГОСТ 9454-78 и ГОСТ 6996-66;

2) . Образцы, изготовленные из металла сварного шва;

3). Образцы основного металла, изготовленные по требованиям RCC-M.

*1). Образцы основного металла и зоны термического влияния, изготовленные по требованиям «российской» нормативной документации*

В необлученном состоянии температура хрупко-вязкого перехода, определяемая по величине поглощенной энергии, находится в районе  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а ударная вязкость – на уровне верхнего шельфа выше  $220\text{ Дж/см}^2$ . После облучения происходит сдвиг температуры хрупко-вязкого перехода на  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и понижение ударной вязкости на  $40\text{...}45\text{ Дж/см}^2$ . Сдвиг, определенный по доле вязкой составляющей в изломе, почти не отличается от сдвига, определенного по ударной вязкости, но абсолютные значения  $T_{50}$  и  $T_{F50}$  для зоны термического влияния на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже, чем для основного металла. Имеются небольшие различия в величине ударной вязкости на верхнем шельфе: для образцов ЗТВ уровень верхнего шельфа ниже на  $25\text{...}30\text{ Дж/см}^2$ , чем у основного металла. Таким образом, зона термического влияния по своим свойствам мало отличается от основного металла, если проводить испытания образцов, взятых по российским нормам.

*2). Образцы металла сварного шва*

Основное отличие образцов заключается в ориентации надреза, который на «российских» образцах расположен тангенциально, а на «французских» радиально (если описывать образцы ориентацией трещины, то LR и L $\theta$  соответственно). Кроме того, места вырезки образцов по ГОСТ 6996-66 расположены ближе к поверхности и корню шва, но зависимости значений ударной вязкости от глубины вырезки образцов не наблюдается. Для обоих типов образцов ударная вязкость на уровне верхнего шельфа до облучения равна  $170\text{ Дж/см}^2$ , и после облучения понижается до  $150\text{...}155\text{ Дж/см}^2$ . Сдвиг кривой KCV(T) на уровне  $6\text{ кГм/см}^2$  ( $59\text{ Дж/см}^2$ ) равен  $54\text{ }^{\circ}\text{C}$  для образцов по ГОСТ 6996-66 и  $58\text{ }^{\circ}\text{C}$  для образцов по RCC-M, однако значения  $T_{K0}$  и  $T_{KF}$  для «российских» образцов ниже на  $10\text{...}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Интересно, что при определении критической температуры по доле вязкого излома разница в абсолютных значениях  $T_{50}$  и  $T_{F50}$  между «российскими» и «французскими» образцами исчезает, а величина сдвигов уменьшается до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ГОСТ 6996-66) и  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  (RCC-M).

Необходимо отметить, что значение предела текучести (см табл. 4) для металла сварного шва ниже

$549\text{ МПа}$ , и по п.5.5. Приложения 2 ПНАЭ Г-7-002-86 [2] критериальное значение ударной вязкости составляет  $49\text{ Дж/см}^2$ . Однако для единообразия в сравнении с другими типами образцов критериальное значение ударной вязкости оставлено равным  $6\text{ кГм/см}^2$  ( $59\text{ Дж/см}^2$ ). Использование критериального значения  $49\text{ Дж/см}^2$  не изменяет ситуацию принципиально, но при этом  $T_K$  понижается на  $7\text{...}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $\Delta T_F$  составляет  $62\text{ }^{\circ}\text{C}$  для «российских» и  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  для «французских» образцов.

*3). Образцы основного металла, изготовленные по требованиям RCC-M*

Образцы этого типа характеризуются самой низкой ударной вязкостью на верхнем шельфе до и после облучения ( $165$  и  $120\text{ Дж/см}^2$ ) и самой высокой  $T_K$ . Однако  $\Delta T_F=38\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $\Delta T_{F50}=33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что близко к значениям, полученным на основном металле и зоне термического влияния при вырезке образцов по российской методике.

Наиболее важным, по-видимому, является различие характеристик, полученное на образцах основного металла, вырезанных по российским и по французским нормативным требованиям.

Ударная вязкость на уровне верхнего шельфа различается в 1,7 раза. Абсолютные значения  $T_{K0}$  и  $T_{KF}$  различаются на  $50\text{...}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для  $T_{50}$  и  $T_{F50}$  различия меньше ( $15\text{...}20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Это связано с тем, что критические температуры хрупкости, определяемые по ударной вязкости и по доле вязкого излома, для «французских» образцов почти не отличаются, а для «российских» отличаются на  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Показанные различия являются следствием технологии изготовления обечайки для корпуса реактора.

Известно, что в цилиндрическом сосуде (каким является корпус реактора), нагруженном внутренним давлением, тангенциальные напряжения превосходят осевые в 2 раза, и более вероятно развитие гипотетической трещины в направлении  $\theta R$  и  $\theta L$ . Поэтому процесс изготовления обечайки ориентирован на придание наилучшей трещиностойкости в указанных направлениях. Российские нормативные документы предлагают оценить свойства в наиболее опасном, с точки зрения распространения трещины в работающем корпусе, направлении (т.е.  $\theta L$ ), а французские – оценить наихудшие свойства металла без учета специфики работы всего корпуса в целом.

Исходя из сказанного, полученные результаты не следует рассматривать как недостаточную консервативность российской методики по определению критической температуры хрупкости. Расчет вероятности хрупкого разрушения конструкции учитывает не только свойства материала, но и действующие в процессе эксплуатации нагрузки и геометрические характеристики существующих или предполагаемых концентраторов напряжений. Это должно приниматься во внимание при оценке консервативности сравниваемых методик.

Металл сварного шва оказался менее чувствителен к ориентации распространения трещины, и критические температуры хрупкости ( $T_{K0}$  и  $T_{KF}$ ) различаются на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  для исходного и на  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  для облученного состояний. Хотя и здесь свойства металла, определенные по российской методике, несколько лучше, но различие не так велико, как в случае с основным металлом. Интересно то, что при измерении  $T_{50}$  и  $T_{F50}$  различия отсутствуют, а величина сдвига, как сказано выше, уменьшается. Причина этого пока неясна. Возможно, что при определении доли вязкой составляющей излома в металле многопроходного сварного шва корреляция между ударной вязкостью и долей вязкого излома носит несколько иной характер, отличный от основного металла.

Таким образом, в случае с металлом сварного шва разница свойств, определенных по российской и французской нормативным документациям, зависит не от методики вырезки образцов, а от способа определения критической температуры хрупкости.

В рамках существующего подхода оценки сдвига температурной зависимости  $K_{IC}$  по величине сдвига критической температуры хрупкости различия методик в случае сварного шва важнее, чем в случае основного металла. Обоснованное принятие  $\Delta T_{F50}$  в качестве меры радиационного охрупчивания (или величины сдвига температурной зависимости  $K_{IC}$ ) могло бы быть одним из предложений по усовершенствованию нормативной документации, позволяющей определять максимальный безопасный срок эксплуатации реакторов с водой под давлением. Однако подобное обоснование не может быть проведено по результатам только одного эксперимента, так как должно базироваться на гораздо большем объеме представительных, статистически обоснованных данных по корреляции между сдвигами температурных зависимостей ударной вязкости, доли вязкого излома и  $K_{IC}$ .

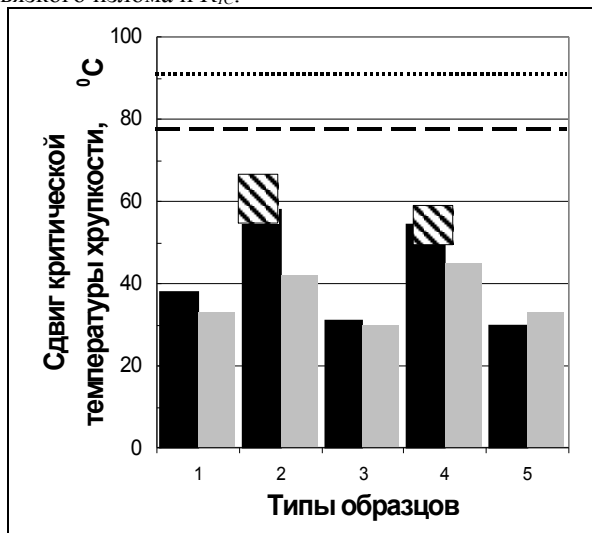


Рис. 5. Экспериментальные сдвиги критических температур хрупкости и их гарантированные значения:

1 – образцы основного металла по требованиям (RCC-M MC 1000, MC 1220); 2 – образцы металла сварного шва (RCC-M MC 1000, MC 1220, S1331);

3 – образцы основного металла (ГОСТ 9454-78);  
 5 – образцы сварного шва (ГОСТ 6996-66); 7 – образцы зоны термического влияния (ГОСТ 6996-6)  
 —  $\Delta T_F$ ; —  $\Delta T_{F50}$   
 —  $T_F$ , при критериальном значении ударной вязкости  $49\text{ Дж/см}^2$  (для сварного шва)

На рис. 5. показаны сдвиги критических температур хрупкости для всех типов образцов и их расположение относительно линий, показывающих гарантированные (приведенные в ПНАЭ Г-7-002-86 [2]) значения  $\Delta T_F$ .

Все значения находятся ниже гарантированных значений для основного металла и сварного шва. Это говорит о высокой радиационной стойкости исследованных материалов независимо от применяемых методик изготовления образцов и определения механических свойств. Кроме того, на этом рисунке видно, что для металла шва различия между сдвигами, определенными по ударной вязкости и доле вязкого излома, достаточно велики, и поэтому выбор более оптимального параметра, характеризующего радиационную стойкость сварного шва, может служить направлением дальнейших исследований.

Что касается отличий между российской и французской методиками при исследовании свойств основного металла, то выводы о преимуществах той или иной методики необходимо делать в контексте полного анализа по оценке степени риска хрупкого разрушения корпуса ядерного реактора.

## ВЫВОДЫ

1. Образцы, изготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ и RCC-M, облучены в стенде «Корпус» на реакторе РБТ-6 при температуре  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$  до флюенса  $(6,6 \pm 0,6) \cdot 10^{19}\text{ см}^{-2}$ . Это соответствует температуре эксплуатации корпуса ВВЭР-1000 и флюенсу на конец проектного срока эксплуатации.

2. Для каждого типа образцов определены критические температуры хрупкости по значениям ударной вязкости и доле вязкой составляющей в изломе. Наиболее существенно отличия в «русской» и «французской» методиках проявляются при определении свойств основного металла. Уровень ударной вязкости на верхнем шельфе для «русских» образцов выше в 1,7 раза, чем у «французских», а критические температуры хрупкости (определенные по ударной вязкости) различаются более чем на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , как для исходного, так и для облученного состояний.

При исследовании металла сварного шва также имеют место различия в определении сдвигов критической температуры хрупкости. Сдвиги, определенные по доле вязкой составляющей в изломе, на  $10\text{...}20\text{ }^{\circ}\text{C}$  меньше сдвигов, определенных по величине ударной вязкости.

3. Изготовление образцов по требованиям RCC-M дает более консервативную оценку состояния материала до и после облучения, и для основного металла различия с образцами, изготовленными по требованиям ГОСТ весьма велики. Металл сварного шва менее чувствителен к способу изготовления образцов, однако определение  $\Delta T_F$  по ударной вязкости и по виду поверхности разрушения дает различие до 20 °С.

4. Все полученные значения  $\Delta T_F$  и  $\Delta T_{F50}$  не превышают 65 °С. Значения критической температуры хрупкости как для основного металла, так и для металла сварного шва после облучения образцов нейтронами до проектного флюенса меньше гарантированных значений, указанных в [2]. В рамках существующего подхода оценки сдвига температурной

зависимости  $K_{IC}$  по величине  $\Delta T_F$  ( $\Delta T_{F50}$ ), различия между методиками невелики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Облучение ампулы М7 в стенде КОППУС /Отчёт. О-4967.* Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000 г.
2. *Правила проектирования и изготовления механических компонентов атомных электростанций с реакторами с водой под давлением (RCC-M) EdF-CLL.* 1995.
3. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ-Г-7-002-86).* М.: «Энергоатомиздат», 1989.

## ПОРІВНЯННЯ РОСІЙСЬКИХ ТА ФРАНЦУЗЬКИХ НОРМАТИВНИХ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОГО ОКРИХЧЕННЯ КОРПУСІВ РЕАКТОРІВ З ВОДОЮ ПІД ТИСКОМ

*В.М. Голованов, Д.В. Козлов, В.І. Прохоров, В.М. Раєцький, В.К. Шамардін,  
В.А. Красносьолов, Ж.П. Массу, К. Тролля, Р. Берtrand*

Наводяться результати експерименту по порівнянню російських та французьких нормативних методик визначення радіаційного окрихчення корпусних сталей.

## COMPARISON OF RUSSIAN AND FRENCH METHODOLOGY OF DETERMINATION OF RADIATION EMBRITTLEMENT OF PRESSURIZED-WATER REACTOR VESSEL

*V.M. Golovanov, D.V. Kozlov, V.I. Prokhorov, V.M. Raetskiy, V.K. Shamardin,  
V.A. Krasnoselov, J.P. Massu, K. Trollya, R. Bertrand*

Experimental results on comparison of Russian and French methodology of determination of radiation embrittlement of pressure vessel steels are presented.