

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЯЗКО-ХРУПКОГО ПЕРЕХОДА ( $T_K$ ) НА ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ИЗ СТАЛИ 15X2НМФА

*Е.А. Крайнюк, В.Г. Лесная Л.С. Ожиглов, В.И. Савченко*  
*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина*

Проведено определение температуры вязко-хрупкого перехода корпусной стали 15X2НМФА в исходном состоянии на образцах различной толщины ( $B_0=2; 5$  и  $10$  мм). Испытания проводились при определении ударной вязкости KCV в температурном интервале  $-196^{\circ}\text{C} \leq T \leq 90^{\circ}\text{C}$ . Значения  $T_K$  для образцов с  $B_0=5$  и  $10$  мм, полученные по общепринятой и унифицированной методикам, совпадают ( $T_K=-20^{\circ}\text{C}$ ). Значение  $T_K$  для малогабаритных образцов ( $B_0=2$  мм) определено по унифицированной методике ( $T_K=-80^{\circ}\text{C}$ ).

### ВВЕДЕНИЕ

С момента введения в эксплуатацию ядерных энергетических установок (ЯЭУ) типа ВВЭР для корпусов реакторов (КР) стали применять малоуглеродистые низколегированные стали. В частности, для КР ВВЭР-1000 используют сталь марки 15X2НМФА.

Корпус реактора является одним из ответственных элементов конструкции ЯЭУ. А его безопасная работа – одно из важнейших условий эксплуатации. В настоящее время актуальным и чрезвычайно важным вопросом является проведение работ по продлению ресурса КР, контролю состояния металла и восстановлению его эксплуатационных свойств.

Одним из главных параметров, определяющих ресурс работы корпусов реакторов ВВЭР, является критическая температура вязко-хрупкого перехода, характеризующая переход из пластического состояния в хрупкое. Значение  $T_K$  используется как характеристика склонности того или иного материала к хрупкому разрушению.

В атомной энергетике определение температуры вязко-хрупкого перехода осуществляют по общепринятым методикам, включающим испытания на ударный изгиб образцов "Шарпи" ( $55 \times 10 \times 10$  мм). Однако, вырезка образцов таких размеров в необходимом количестве из эксплуатирующегося КР, находящегося на плановом ремонте, может привести к возникновению различных дефектов в КР, что создаст аварийную ситуацию.

В последние годы была разработана методика и создан технологический комплекс "Микрорез" [1], позволяющий без нарушения конструкционной целостности и прочности металлических конструкций ЯЭУ вырезать темплеты, из которых в дальнейшем

изготавливают стандартные малогабаритные образцы ( $55 \times 8 \times 2$  мм) для испытаний на ударный изгиб, а также образцы для статических испытаний.

С помощью такого технологического комплекса из энергоблоков различных АЭС уже неоднократно осуществлялась вырезка темплетов и изготовление малогабаритных образцов, на которых определяли ударную вязкость и прочностные характеристики.

Целью настоящей работы является определение температуры вязко-хрупкого перехода ( $T_K$ ) корпусной стали 15X2НМФА на образцах различной толщины; в частности, на малогабаритных образцах, изготавливаемых из темплетов.

### 1. МАТЕРИАЛЫ

Исследования проводили на малоуглеродистой низколегированной стали марки 15X2НМФА в исходном состоянии. В качестве исследуемого материала был взят фрагмент корпуса реактора, который и являлся исходной заготовкой для получения образцов.

Предварительное металлографическое исследование образцов показало, что структура стали представляет собой мелкодисперсный сорбит отпуска.

В табл. 1 представлен химический состав данной стали как по литературным данным, так и фактический химический состав легирующих элементов фрагмента.

Фактический химсостав фрагмента КР определялся в соответствии с [3-8].

Для проведения статических испытаний (растяжение) в соответствии с [9] были вырезаны образцы двух типов (тип 1 – плоские, тип 3 – цилиндрические).

Таблица 1

Химический состав стали 15X2НМФА, вес. %

	C	Cr	Ni	Mo	V	Mn	Si	Cu	P	S
Литературные данные [2]	0,13*	1,80	1,00	0,50	0,10	0,30	0,17	не более		
	0,18**	2,30	1,50	0,70	0,12	0,60	0,37	0,30	0,020	0,020
Фактический	-	1,82	1,10	0,60	0,10	0,50	0,30	-	-	-

Примечание: \* – нижний предел; \*\* – верхний предел.

Для динамических испытаний (ударный изгиб) было изготовлено три серии образцов разного типа (тип 11, 13, 14) с V-образным концентратором

напряжений [10]. Вся информация об исследуемых образцах приведена в табл. 2.

Таблица 2

Образцы для ударных испытаний

Серия	Тип	L, мм	V <sub>0</sub> , мм	H, мм	H <sub>1</sub> , мм	Тип концентратора
1	11	55	10	10	8	V-образный
2	13	55	5	10	8	V-образный
3	14	55	2	8	6	V-образный

Примечание: L – длина образца; V<sub>0</sub> – ширина образца; H – полная высота образца; H<sub>1</sub> – высота образца в месте концентратора.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Механические испытания на растяжение [9] проводили на универсальной испытательной машине 1246-2/2300 при температуре 20°C. Скорость деформирования образцов 1 и 3 типов составляла 2 мм в мин.

Значения ударной вязкости [10] определяли на копре типа ПСВ-30 с запасом энергии маятника 30 кгс•м для образцов 11 типа и запасом энергии маятника 15 кгс•м для образцов 13 и 14 типов. Испытания проводились в температурном интервале: -196°C ≤ T ≤ 90°C.

В качестве охлаждающей среды использовался этиловый спирт, который охлаждался жидким азотом [11].

Определение вязкой составляющей в изломе образцов 11 типа проводили согласно [12]. Пример схемы излома образца показан на рис. 1. Хрупкая составляющая, обозначенная как площадь F<sub>1</sub>, имеет вид трапеции и увеличивается по мере увеличения доли этой составляющей. Вязкая составляющая – F<sub>2</sub>. Площадь F<sub>1</sub>, занимаемую хрупкой составляющей, определяли как произведение средней линии трапеции a на высоту трапеции v.

Зная параметры a и v, процент вязкой составляющей определяли по ГОСТу [12]. Определение температуры вязко-хрупкого перехода проводили по об-

щепринятой методике, применяемой для образцов 11 типа, согласно правилам и нормам атомной энергетики [13].

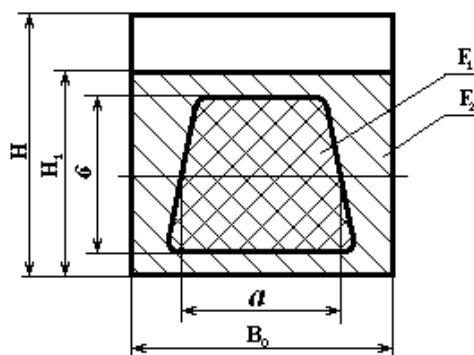


Рис. 1. Схема ударного излома образца:

H – полная высота образца; H<sub>1</sub> – высота образца в месте концентратора напряжений; V<sub>0</sub> – толщина образца; a – средняя линия трапеции; v – высота трапеции

По завершению ударных испытаний выполняли построение графиков зависимости ударная вязкость (KCV) – температура испытаний (T). По известному пределу текучести материала в исходном состоянии при температуре 20°C в соответствии со значениями, указанными в табл. 3 и 4, выбирались критериальные значения ударной вязкости (KCV)<sub>I</sub> и (KCV)<sub>II</sub>.

Таблица 3

Критериальные значения ударной вязкости при температуре T<sub>K</sub>, °C

Предел текучести при температуре 20°C R <sub>p0,2</sub> <sup>T</sup> , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Ударная вязкость (KCV) <sub>I</sub> , Дж/см <sup>2</sup> (кгс•м/см <sup>2</sup> )
До 304 (31) включительно	29 (3,0)
304 (31) до 402 (41) включительно	39 (4,0)
402 (41) до 549 (56) включительно	49 (5,0)
549 (56) до 687 (70) включительно	59 (6,0)

Таблица 4

Критериальные значения ударной вязкости при температуре T<sub>K</sub>+30, °C

Предел текучести при температуре 20°C R <sub>p0,2</sub> <sup>T</sup> , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	Ударная вязкость (KCV) <sub>I</sub> , Дж/см <sup>2</sup> (кгс•м/см <sup>2</sup> )
До 304 (31) включительно	44 (4,5)
304 (31) до 402 (41) включительно	59 (6,0)
402 (41) до 549 (56) включительно	74 (7,5)
549 (56) до 687 (70) включительно	89 (9,0)

Предел текучести определяли как среднее значение результатов испытаний трех образцов. На графике ударная вязкость – температура на оси ординат

(ось KCV) откладывали значение (KCV)<sub>I</sub>. Через полученную точку проводили линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой ударной вяз-

кости. Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принимали за температуру  $T_1$ . То же проделывали и со значением  $(KCV)_n$ , а ближайшую от точки пересечения более высокую температуру принимали за температуру  $T_2'$ .

На графике вязкая составляющая в изломе – температура на оси ординат откладывали значение  $V=50\%$ . Через полученную точку проводили линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой, построенной по минимальным значениям вязкой составляющей.

Ближайшую от точки пересечения более высокую температуру, при которой проводились испытания, принимали за температуру  $T_2''$ . Большую из

температур  $T_2'$  и  $T_2''$  обозначали как  $T_2$ . Если разница между  $T_2$  и  $T_1$  оказывалась меньше, чем  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , то температуру  $T_1$  принимали в качестве ориентировочного значения температуры  $T_K$ . Если это условие не выполнялось, то  $T_K$  определяли по формуле [1]:

$$T_K = T_2 - 30\text{ }^\circ\text{C}.$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предварительные механические испытания на растяжение показали, что пределы прочности ( $R_m^T$ ) и текучести ( $R_{p0.2}^T$ ) исследуемой стали находятся в пределах значений, установленных соответствующими правилами и нормами. Результаты статических испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

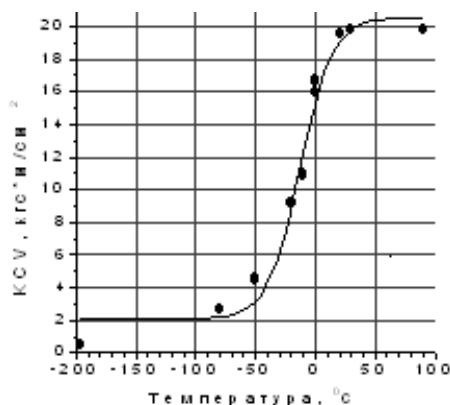
Результаты испытаний на растяжение

Образец	Тип	$a_0$ , мм	$b_0$ , мм	$R_m^T$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$R_{p0.2}^T$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$T_{исп}$
Плоские образцы						
1	1	3.0	2.0	79.04	60.14	+20
2				82.51	61.06	
3				83.89	67.79	
Цилиндрические образцы						
4	3	Д=4,0 мм		85.20	70.74	+20
5				83.20	70.62	

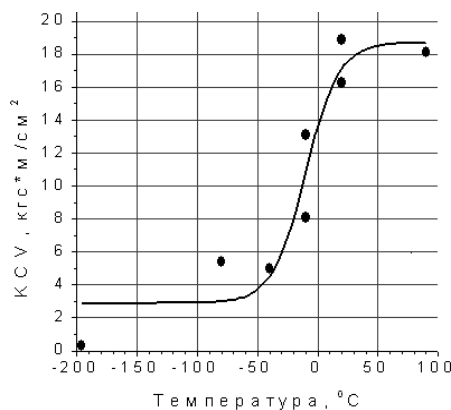
Примечание:  $a_0$ ,  $b_0$  и  $d$  – высота, ширина и диаметр рабочей части образца, соответственно.

На основании полученных результатов ударных испытаний были построены для образцов 11, 13 и 14 типов зависимости ударная вязкость – температура

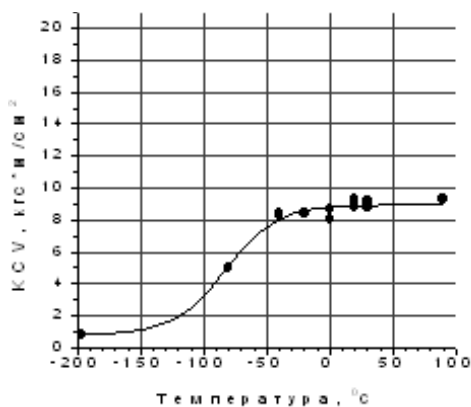
$KCV(T)$  и вязкая составляющая – температура  $V(T)$ , которые представлены на рис. 2.



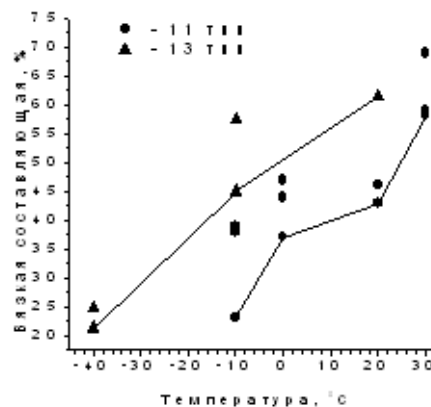
а



б



В



Г

Рис. 2. Зависимость ударной вязкости (KCV) от температуры (T): а – для образцов 11 типа; б – для образцов 13 типа; в – для малогабаритных образцов (14 тип); г – зависимость вязкой составляющей (B) от температуры (T) для образцов 11 и 13 типов

Сравнение между собой полученных зависимостей показывает, что для малогабаритных образцов температурный интервал резкого изменения ударной вязкости смещен влево и имеет меньший угол наклона. Вместе с этим для малогабаритных образцов отмечается снижение (приблизительно в 2 раза) уровня верхнего «шельфа». В то время как для образцов 13 типа по сравнению с кривой KCV(T) образцов 11 типа значительного изменения в ходе и расположении кривой не наблюдается.

Согласно общепринятой методике [13] для образцов 11 типа с помощью выбранных критериальных значений  $(KCV)_I=6,0$  кгс·м/см<sup>2</sup> и  $(KCV)_{II}=9,0$  кгс·м/см<sup>2</sup> из графиков зависимостей KCV(T) и B(T) (см. рис.2, а, г) по температурным значениям  $T_1, T_2'$  и  $T_2$  была определена температура вязко-хрупкого перехода:  $T_{K0} = -20^\circ\text{C}$ .

Так как зависимости KCV(T) для образцов с толщиной  $B_0=5$  и 10 мм практически одинаковы, то определение температуры  $T_{K0}$  для образцов 13 типа проводили по той же общепринятой методике [13], используя зависимости KCV(T) и B(T) (см. рис.2, б, г). Полученное значение  $T_{K0}$  также оказалось равным  $-20^\circ\text{C}$ .

Для малогабаритных образцов (14 тип) изменение профиля зависимости KCV(T) (см. рис.2, в) исключает возможность применения выше описанной методики. Это связано с падением уровня верхнего «шельфа» ниже критериального уровня  $(KCV)_{II}$ , что не даёт возможности определить  $T_{K0}$ .

Поэтому для определения  $T_{K0}$  на малогабаритных образцах применима унифицированная методика, предназначенная для определения температуры вязко-хрупкого перехода материала как в исходном  $T_{K0}$ , так и облученном  $T_{KF}$  состояниях на малогабаритных образцах. У подобных образцов визуальный анализ изломов затруднен и информация, как правило, ограничена определением работы разрушения. За переходную температуру в этом случае принимается температура  $T_{K0.5}$  ( $T_{K0.5} \equiv T_{K0}$ ), при которой среднее значение ударной вязкости составляет половину

от работы вязкого разрушения. В целях единообразия этот критерий часто используют и при испытаниях стандартных образцов [14].

Так, например, определение температуры хрупкости  $T_{K0}$  на стандартных образцах 11 типа и образцах 13 типа по методике [14] дало такое же значение  $T_{K0.5}$ , как и по методике [13] –  $T_K = -20^\circ\text{C}$ . Определенное значение  $T_{K0.5}$  для малогабаритных образцов по методике [14] равно  $-80^\circ\text{C}$ . Подобное смещение  $T_{K0.5}$  в область низких температур и уширение интервала  $\Delta T$ , на котором происходит падение ударной вязкости, согласуется с зависимостью  $T_K$  от толщины образца, что также отмечено в работах [15,16].

## ВЫВОДЫ

На образцах различной толщины, вырезанных из фрагмента корпуса реактора ВВЭР-1000, определена температура вязко-хрупкого перехода стали 15X2Н-МФА.

Для определения  $T_{K0}$  на малогабаритных образцах была применена унифицированная методика, по которой полученное значение  $T_{K0}$  равняется  $-80^\circ\text{C}$ .

Для образцов 13 и 11 типов значения температуры вязко-хрупкого перехода, полученные по общепринятой и унифицированной методикам, совпадают:  $T_{K0} = -20^\circ\text{C}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методика определения механических свойств металла оборудования и трубопроводов АЭС с помощью микрообразцов. РД.00.ЭК.ХФ.МО.09-99.
2. Ю.Ф. Баландин, И.В. Горынин, Ю.И. Звездин, В.Г. Марков. Конструкционные материалы АЭС. М.: «Энергоатомиздат», 1984, 47 с.
3. ГОСТ 12346-78. Стали легированные и высоколегированные. Методы химического анализа (методы определения хрома).
4. ГОСТ 12348-78. Стали легированные и высоколегированные. Методы химического анализа (методы определения марганца).

- 5.ГОСТ 12350-78. *Стали легированные и высоколегированные. Методы химического анализа (методы определения кремния).*
- 6.ГОСТ 12351-81. *Стали легированные и высоколегированные. Методы химического анализа (методы определения ванадия).*
- 7.ГОСТ 12352-81. *Стали легированные и высоколегированные. Методы химического анализа (методы определения никеля).*
- 8.ГОСТ 12354-81. *Стали легированные и высоколегированные. Методы химического анализа (методы определения молибдена).*
- 9.ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение.*
- 10.ГОСТ 9454-78. *Металлы. Методы испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.*
11. *Прочность материалов и конструкций при низких температурах* /Сб. трудов. Киев: «Наукова думка», 1984.
- 12.ГОСТ 4543-71. *Методика определения процента вязкой составляющей в изломе ударных образцов (для улучшаемой стали).*
13. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86)* //Госатомэнергонадзор СССР. М.: «Энергоатомиздат», 1989, 525 с.
14. *Радиационное повреждение стали корпусов ВВЭР.* М.: «Энергоиздат», 1981. Ч.1, с. 29 – 30.
15. Я.Б. Фридман. *Механические свойства металлов.* М.: «Машиностроение», 1974. Т. 2, с. 165 – 166.
16. *Прочность материалов и конструкций при низких температурах* /Сб. трудов. Киев: «Наукова думка». 1984, с. 166.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГРУЗЛО-КРИХКОГО ПЕРЕХОДУ НА ЗРАЗКАХ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ ЗІ СТАЛІ 15X2НМФА**

*Л.С. Ожигов, Є.О. Крайнюк, В.І. Савченко, В.Г. Лісна*

Проведено визначення температури грузло-крихкого переходу  $T_K$  корпусної сталі 15X2НМФА у вихідному стані на зразках різної товщини ( $B_0=2, 5$  і  $10$  мм). Испити проводилися при визначенні ударної в'язкості KCV у температурному інтервалі  $-196 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Значення  $T_K$  для зразків з  $B_0=5$  і  $10$  мм, одержані по загальноприйнятій і уніфікованій методиці, збігаються ( $T_K = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Значення  $T_K$  для малогабаритних зразків ( $B_0=2$  мм) отримано за уніфікованою методикою ( $T_K = -80 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### **DETERMINATION OF DUCTILE-BRITTLE TRANSITION TEMPERATURE ON THE DIFFERENT THICKNESS SAMPLES OF STEEL 15Cr2NiMoV**

*L.S. Ozhigov, E.A. Krainyuk, V.I. Savchenko, V.G. Lesnaya*

It have been determined the temperature of a ductile-brittle transition of  $T_K$  pressure vessel steel 15Cr2NiMoV in initial condition on the samples of different thickness ( $B_0=2, 5$  and  $10$  mm). Tests were conducted with determination of fracture toughness KCV in temperatures interval  $-196 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Data of  $T_K$  for samples with  $B_0=10$  and  $5$  mm, obtained by standard and unificated method, are coincide ( $T_K = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Data of  $T_K$  for micro-samples ( $B_0=2$  mm) is obtained by unificated method ( $T_K = -80 \text{ }^\circ\text{C}$ ).