



МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000

А. С. ЗУБЧЕНКО, Г. С. ВАСИЛЬЧЕНКО, доктора техн. наук, Е. Г. СТАРЧЕНКО, С. И. НОСОВ, кандидаты техн. наук (ФГУП «ЦНИИТМАШ», г. Москва, РФ)

Изучено влияние содержания никеля в металле шва в сварных соединениях стали 15Х2НМФАА на склонность их хрупкому разрушению, в том числе после радиационного облучения. Показано, что характеристики механических свойств металла швов с содержанием никеля не более 1,3% не ниже нормативных требований. Рекомендуется расчет реакторов на сопротивляемость хрупкому разрушению проводить по вязкости разрушения сварных соединений с использованием нормативной кривой.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированная сталь, корпус реактора, сварные соединения, механические свойства, хрупкость, вязкость разрушения

Автоматическую сварку серийных корпусов реакторов ВВЭР-1000, изготовленных из сталей марок 15Х2НМФА и 15Х2НМФАА, выполняли с использованием проволоки Св-12Х2Н2МАА в сочетании с флюсом ФЦ-16 и ФЦ-16А. При этом в металле шва обеспечивалось 1,2...1,9 % Ni. С целью уточнения роли никеля в формировании эксплуатационных характеристик металла корпусов реакторов выполнены исследования по оценке влияния содержания никеля на склонность металла шва к хрупкому разрушению, в том числе после радиационного облучения. Для исследований использованы промышленные партии сварочной проволоки Св-12Х2Н2МАА с содержанием 1,25 и 1,6 % Ni (плавки 178058 и 179687) и изготовлена опытная партия проволоки с 2,48 % Ni (при содержании других элементов на уровне требований технических условий на проволоку Св-12Х2Н2МАА). Сварные соединения толщиной 190 мм выполнены с соблюдением требований нормативной документации на сварку и термическую обработку стали 15Х2НМФАА. Химический состав, ударная вязкость и критическая температура хрупкости металла сварных швов приведены в табл. 1 и 2.

Радиационную стойкость металла швов исследовали по методике ГНЦ ИАЭ. Радиационное охрупчивание металла сварных швов с различным содержанием никеля оценивали по сдвигу критической температуры хрупкости ΔT_F после облучения флюенсом (24...260)·10²² Н/м² при $E > 0,5$ МэВ. Результаты испытаний показали, что наблюдаемая корреляционная связь между значением нормативного флюенса и сдвигом T_{k0} металла шва близка к линейной (рис. 1). Подтверждаются данные, что сдвиг ΔT_F металла сварных швов с содержанием никеля более 1,30 %

(как и до 1,30 %) после облучения флюенсом, соответствующим расчетному за 40 лет эксплуатации реактора ВВЭР-1000 ($\leq 64 \cdot 10^{22}$ Н/м²), не превышает значений, гарантированных аттестационным отчетом. Усиление влияния никеля на радиационное охрупчивание проявляется при значении флюенса, значительно превышающем расчетное. Принято решение о корректировке химического состава сварочной проволоки Св-12Х2Н2МАА в части снижения содержания в ней никеля примерно до 1,30 % при одновременном

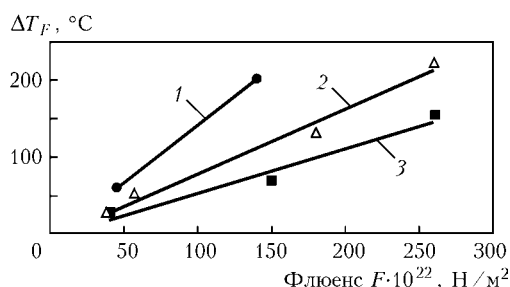


Рис. 1. Радиационное охрупчивание металла шва при различном содержании никеля: 2,45 (1); 1,60 (2); 1,28 % (3) ($E > 0,5$ МэВ)

Таблица 1. Химический состав металла сварных швов

№ плавки проволоки, партии флюса	Массовая доля элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Cu
178058, 139	0,064	0,25	1,08	1,60	1,28	0,55	0,011	0,009	0,055
179687, 69	0,065	0,32	0,86	1,83	1,60	0,60	0,006	0,007	0,060
Опытная плавка, 139	0,078	0,27	1,10	1,68	2,45	0,65	0,007	0,006	0,030
22554, 235	0,080	0,30	0,75	2,00	1,10	0,62	0,012	0,006	0,040

Таблица 2. Свойства металла сварных швов после отпуска

№ плавки проволоки, партии флюса	Критическая температура хрупкости, °C	Ударная вязкость при 20 °C, Дж/см ²
178058, 139	-30...-40	180...190
179687, 69	-30...-40	143...193
Опытная плавка, 139	-20...-30	150...170

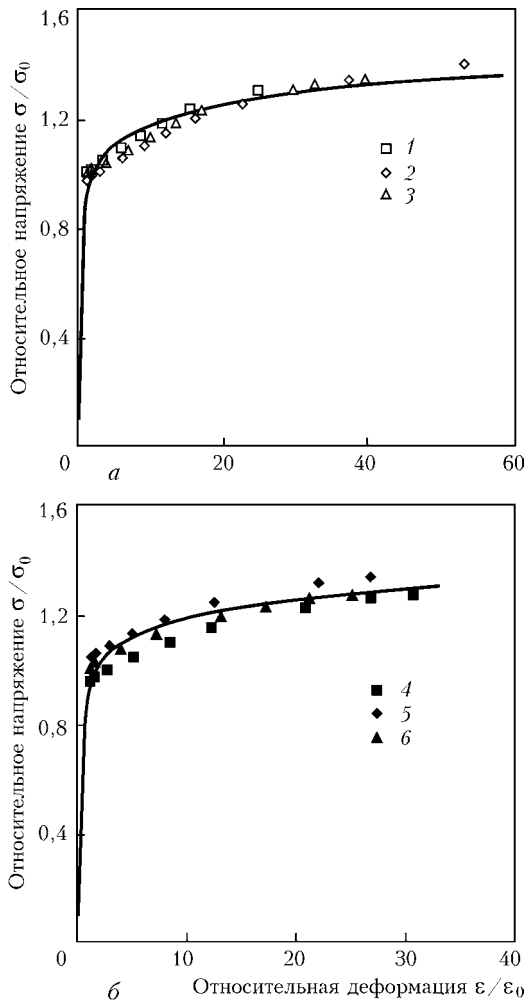


Рис. 2. Диаграмма деформирования металла шва при 20 (а) и 350 (б) °С и ее аппроксимация по методу Рамберга-Осгуда (кривая – аппроксимация Рамберга-Осгуда): а – $\epsilon/\epsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + 1,048(\sigma/\sigma_0)^{12,7}$, $\sigma_0 = 470,2$ МПа, $\epsilon_0 = 0,224$ %; б – $\epsilon/\epsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + 0,891(\sigma/\sigma_0)^{13,67}$, $\sigma_0 = 406,4$ МПа, $\epsilon_0 = 0,214$ %; 1-б – номера образцов

ужесточении требований к содержанию примесных элементов ($\leq 0,006$ % Р, $\leq 0,006$ % S, $\leq 0,06$ % Cu).

Для исследования характеристик сопротивления хрупкому разрушению металла сварного шва, выполненного промышленной партией проволоки Св-12Х2Н2МАА (плавка 22554) откорректированного состава, на ОАО «Ижорские заводы» изготовлены сварные соединения из стали 15Х2НМФА толщиной 250 мм. Из них выполнены образцы для испытаний на растяжение при температуре 20 и

Таблица 3. Механические свойства металла сварных швов образцов

№ образца	Температура испытания, °С	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
1	20	484...494	588...591	22,6...25,0	73,1...75,0
2		3 × 488	3 × 589	3 × 23,5	3 × 73,7
3		(422)	(539)	(15,0)	(55,0)
4	350	412...450	491...518	15,8...18,2	67,8...69,5
5		3 × 428	3 × 499	3 × 17,2	3 × 68,5
6		(392)	(490)	(17,0)	(50,0)

Примечания. 1. В числителе дан разброс значений, в знаменателе – среднее. 2. В скобках указаны значения по требованиям норматива.

Таблица 4. Результаты испытаний образцов СТ-1Т

№ образца	Температура испытания, °С	Размер трещины, мм	Разрушающая нагрузка, Н	Вязкость разрушения, МПа√м
1	-50	24,15	6870	160,0
2	-50	24,4	6600	142,3
3	-50	24,5	6800	170,0
4	-60	24,7	6400	129,0
5	-70	27,9	6660	121,4
6	-70	24,7	3470	58,0
7	-70	24,5	5200	96,1
8	-70	24,8	5330	104,4
9	-70	26,1	5000	103,2
10	-70	24,5	5200	98,0
11	-70	24,8	4700	83,5
12	-70	25,0	4200	80,3

350 °С, ударные образцы с надрезом Шарпи, а также компактные образцы СТ-1Т и СТ-4Т.

После выполнения сварки проведена термообработка по штатному режиму 620 °С (25 ч) + 650 °С (20 ч). Вырезку заготовок для изготовления теплов и образцов выполняли механическим способом в соответствии с техническими требованиями, указанными на чертежах и технологических картах на изготовление образцов из контрольных сварных соединений. Результаты испытаний образцов на растяжение приведены в табл. 3, из которой видно, что все они удовлетворяют нормативным требованиям. Диаграммы деформирования, записанные при испытании образцов на растяжение, использованы для построения диаграмм Рамберга-Осгуда при температуре 20 (рис. 2, а) и 350 °С (рис. 2, б).

Ударные образцы с надрезом Шарпи в металле шва были испытаны на копре PSW-300 при температуре от +20 до -40 °С. На рис. 3 приведены экспериментальные значения всех 20 образцов и построены температурные зависимости средних значений ударной вязкости и минимальные значения процента вязкой составляющей в изломах. Сравнение построенных зависимостей с критериальными значениями в соответствии с правилами, изложенными в документе [1], определили критическую температуру хрупкости металла шва $T_k = -20$ °С, которая значительно ниже, чем нормативное требование к металлу сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000 ($T_k = 0$ °С).

Результаты испытаний ударных образцов Шарпи позволили также оценить температуру для испытания компактных образцов СТ-1Т [2] (при которой среднее значение вязкости разрушения $K_{Jc} = 100$ МПа√м)

$$T_k = T_{28 \text{ Дж}} + C, \quad (1)$$

где С – поправка для образцов Шарпи, равная -18 °С.

Рис. 3 позволяет оценить температуру $T_{28 \text{ Дж}} = -32$ °С, а следовательно, $T_{II} = -50$ °С. После наведения трещин

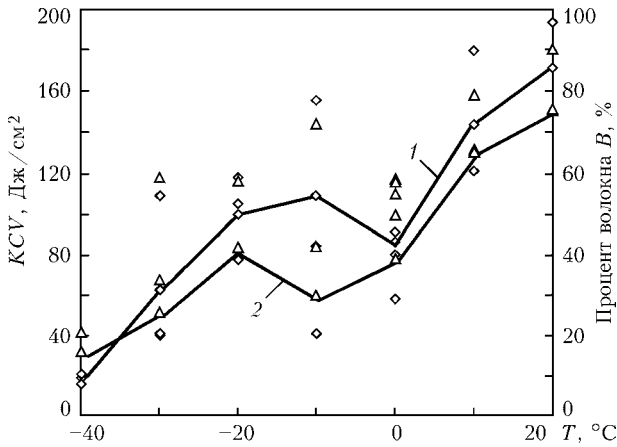


Рис. 3. Зависимость средних значений K_{IC} (1) и минимальных значений процента волокна (2) от температуры

от надрезов в соответствии с требованием [3] испытания первых образцов СТ-1Т определили значение $K_{JC} > 140$ МПа $\sqrt{м}$, что привело к снижению температуры испытаний последующих образцов СТ-1Т до $T_k = -70$ °С. Испытания при $T = -70$ °С восьми образцов (все оказались действительными) определили разброс значений K_{JC} при среднем значении вязкости разрушения порядка 100 МПа $\sqrt{м}$, что необходимо для построения «мастер кривой» [2]. Результаты испытаний всех 12 образцов СТ-1Т приведены в табл. 4.

Обработку экспериментальных данных, полученных на образцах СТ-1, осуществляли по формулам, приведенным в расчетной части документа [2]. Результаты расчета определили для образцов СТ-1Т испытанного сварного соединения справочную температуру $T_0 = -60$ °С. Для построения «мастер-кривой» использовали выражение

$$K_{JC} = 30 + 70 \exp[0,019(T_n - T_0)] \text{ (МПа}\sqrt{м}\text{)}. \quad (2)$$

Границы допуска 5 и 95 % вычисляли по формуле

$$K_{JC} = D_1 + D_2 \exp[0,019(T_n - T_0)], \quad (3)$$

где D_1, D_2 — справочные коэффициенты из [2].

«Мастер-кривая» и границы допуска для исследованного металла шва получены с использованием результатов испытаний образцов СТ-1Т (рис. 4). Видно, что практически все опытные

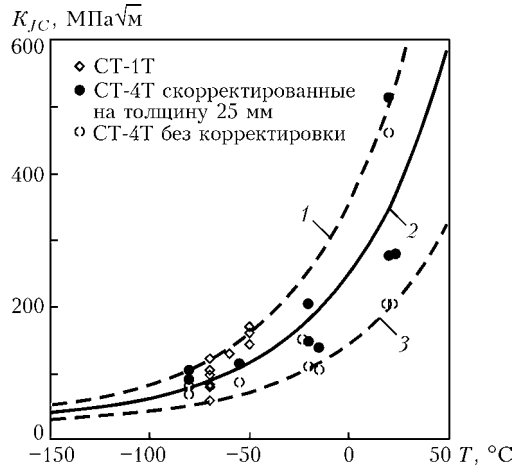


Рис. 4. «Мастер-кривая» (2) для металла сварного шва соответственно с 95 (1), 5 %-м (3) доверительными интервалами

точки попадают в выбранные границы допуска. Компактные образцы СТ-4Т были изготовлены из той же сварной пробы, что и образцы СТ-1Т.

Для наведения усталостных трещин от надрезов использовали испытательную машину ЦДМ-200Пу. Начальное циклическое нагружение до появления трещин на боковых поверхностях проводили при максимальной нагрузке $P_{max} = 450$ кН и минимальной $P_{min} = 80$ кН в течение приблизительно 60 000 циклов. Последние 5 мм трещины создавали при $P_{max} = 150$ кН и $P_{min} = 30$ кН в течение 50 000 циклов. Испытания образцов СТ-4Т после наведения трещины осуществляли на машине ЦДМ-200Пу, оснащенной датчиками силы и смещения, системой записи деформирования образца, а также криокамерой для охлаждения образцов парами жидкого азота. Контроль температуры охлаждаемого образца осуществляли непрерывно с использованием хромель-алюмелевых термопар, головки которых приваривали в зоне конца наведенной трещины.

Значение K_{JC} для образцов СТ-4Т определяли с учетом оценки пластической составляющей энергии разрушения только для одного образца, испытанного при +20 °С и имеющего к моменту разрушения статическое подрастание начальной усталостной трещины 2,15 мм. Остальные восемь образцов имели разрушение без статического подрастания трещины, что позволило определять значение K_{JC} только по упругой составляющей.

Полученные для образцов СТ-4Т значения K_{JC} также пересчитаны на толщину образца СТ-1Т по формуле

$$K_{1JC} = K_{min} + (K_{4JC} - K_{min}) (B_4/B_1)^{1/4}, \quad (4)$$

где $K_{min} = 20$ МПа $\sqrt{м}$; K_{1JC}, K_{4JC} и B_1, B_4 — соответственно вязкость разрушения и толщина образца СТ-1Т и СТ-4Т.

Результаты испытаний образцов СТ-4Т приведены в табл. 5. Измеренные значения K_{JC} образцов СТ-4Т как фактические, так и пересчитанные на толщину 25 мм приведены на рис. 4. Доверительные интервалы

Таблица 5. Результаты испытаний образцов СТ-4Т

№ образца	Температура испытания, °С	Размер трещины, мм	Разрушающая нагрузка $\times 10^4$, Н	Вязкость разрушения, МПа $\sqrt{м}$	
				фактическая	с пересчетом на толщину 25 мм
1	20	107,85	72,2	202,9	276,9
2	20	104,02	108	369	512
3	20	103,40	83	203,9	279,3
4	-15	104,4	46,5	103,5	138,3
5	-20	103,2	50,0	109,6	146,7
6	-20	103,9	67,6	149,8	203,1
7	-55	104,64	38,5	86,4	113,6
8	-80	104,40	37,4	80,6	105,4
9	-80	104,10	31,24	69,5	89,6

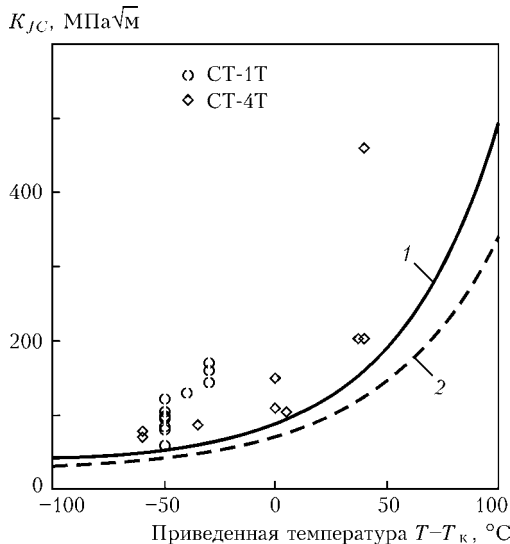


Рис. 5. Сравнение результатов испытаний на вязкость разрушения образцов СТ-1Т и СТ-4Т с нормативной кривой для сварных соединений корпусов реакторов ВВЭР-1000: 1 — нормативная кривая $[K_{Jc}]_3 = 35 + 53 \exp[0,0217(T - T_k)]$ [1]; 2 — базовая кривая $K_{Jc} = 23 + 48 \exp[0,019(T - T_k)]$ [4]

5 и 95 % «мастер-кривой», полученные по результатам испытаний образцов СТ-1Т, подтверждаются результатами испытаний образцов СТ-4Т толщиной 100 мм как фактическими, так и пересчитанными на толщину 25 мм (рис. 5). На рисунке приведены

результаты испытаний образцов СТ-1Т и СТ-4Т в зависимости от температуры, равной разнице температуры испытания образца и критической температуры хрупкости металла шва $T_k = -20$ °С. Видно, что даже минимальные значения вязкости разрушения образцов толщиной 25 и 100 мм удовлетворяют требованиям нормативной кривой для сварных соединений корпусных сталей [1].

В заключение следует отметить, что уточненная штатная технология, обеспечивающая изготовление сварных швов с меньшим содержанием никеля, рекомендуется для изготовления корпусов реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1500, а расчет этих реакторов на сопротивление хрупкому разрушению следует проводить с использованием нормативной кривой по вязкости разрушения сварных соединений [1].

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
2. ASTM E 1921-97. Standard method for determination of reference temperature for ferritic steels in transition range. — 1997. — 17 p.
3. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Госстандарт СССР, 1985. — 61 с.
4. Методика прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения материалов корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 / Б. З. Марголин, В. А. Швецова, В. А. Николаев и др. — 2001. — 70 с.

Effect of nickel content of weld metal in steel 15Kh2NMFAA welded joints on their brittle fracture, including after radiation exposure, has been studied. It is shown that mechanical properties of the weld metal with nickel content of not more than 1.3 % are not lower than those given in specifications. It is recommended that design of reactors to brittle fracture resistance should be performed on the basis of fracture toughness of welded joints using a standard curve.

Поступила в редакцию 22.09.2003

НОВОСТИ НКМЗ

НКМЗ отмечен дипломом «золотой» выставки

Из более чем ста участников проходившей в Москве Шестой международной выставки «Золото 2004. От месторождения до ювелирного изделия» только НКМЗ был отмечен специальным дипломом «Надежный поставщик высококачественного оборудования для золотодобывающей промышленности России».

Показательным примером современного сотрудничества стали взаимоотношения с российской золотодобывающей компанией «Полюс». В 2000 г. она первой приобрела новинку — шнекозубчатую дробилку, представленную НКМЗ на очередной выставке. На выставке «Золото-2004» зам. главного механика компании «Полюс» Иван Алеханов подчеркнул, что, сделав ставку на НКМЗ, они не прогадали. В первой машине наработка дробящих валов на износ составила 450 тыс. т золотосодержащей руды. А вторая машина, усовершенствованная, поставленная в ноябре прошлого года, уже через несколько месяцев эксплуатации показала 600 тыс. т. Непосредственно на выставке были проведены переговоры с представителями «Полюса» о расширении объемов поставки техники НКМЗ для всей технологической цепочки добычи и переработки руды.

У посетителей выставки «Золото-2004» из всей продукции, представленной в экспо-модуле НКМЗ, наибольшим вниманием пользовался новый буровой станок, презентация которого состоялась на Центральном ГОКе (г. Кривой Рог, Украина) в конце прошлого года.