



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И РЕСУРСА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР

Академик РАН **И. В. ГОРЫНИН**, **Г. П. КАРЗОВ**, д-р техн. наук,
Б. Т. ТИМОФЕЕВ, **С. Н. ГАЛЯТКИН**, кандидаты техн. наук
 (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», г. С.-Петербург, РФ)

Приведены результаты накопленного опыта по совершенствованию сталей и сварочных материалов, используемых при изготовлении реакторов ВВЭР атомных электростанций. Особое внимание уделено вопросам радиационного и теплового охрупчивания соединений, влияющих на безопасность реакторов при длительной эксплуатации.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированные стали, реакторы ВВЭР, атомная станция, радиационное и тепловое охрупчивание, металл шва, безопасность, ресурс, совершенствование материалов

В настоящее время в России, Украине, Армении, в других странах ближнего зарубежья, а также в Финляндии находится в эксплуатации более 50 реакторов типа ВВЭР мощностью 440 и 1000 МВт, из которых 9 реакторов типа ВВЭР-440 первого поколения (для четырех из них проектный срок службы 30 лет продлен на 10–15 лет), 18 реакторов этого же типа второго поколения и 24 реактора типа ВВЭР-1000. Все они сконструированы из теплоустойчивых сталей марок 15Х2МФА и 15Х2НМФА с использованием сварочных материалов, разработанных в ЦНИИ КМ «Прометей» и ЦНИИТмаш. Корпуса реакторов обоих типов состоят из семи обечаек из сталей указанных выше марок. Обечайки соединены между собой автоматической дуговой сваркой (АДС) под слоем флюса с использованием различных сварочных материалов (проволоки и флюсов).

При сварке кольцевых швов реакторов ВВЭР-440, изготовленных из стали 15Х2МФА (обечайки

активной зоны имеют толщину 140 мм, обечайки зоны патрубков – 240 мм), используют сварочную проволоку марки Св-10ХМФТ и флюс АН-42. Первоначально сварку выполняли при высокой (до 350 °С) температуре нагрева, затем сварное соединение подвергали немедленному отпуску. По такой технологии изготовлены все корпуса реакторов первого поколения ВВЭР-440/230. В 1975 г. при сварке кольцевых швов обечайки активной зоны корпуса реактора ВВЭР-440/213 второго поколения для АЭС «Ловииса» (Финляндия) применяли более чистую по содержанию вредных примесей проволоку марки Св-10ХМФТУ и флюс АН-42М (табл. 1).

Использование указанных сварочных материалов позволило получить металл шва с содержанием фосфора до 0,012 мас. % и меди до 0,10 мас. %, что заметно повысило его радиационную стойкость. С момента изготовления реактора типа ВВЭР-440 для АЭС «Ловииса» к металлу шва, а также к основному металлу стали предъявляться более высокие требования к обеспечению высокого сопротивления хрупкому разрушению. С этой целью определили критическую температуру хрупкости

Таблица 1. Требования к химическому составу (мас. %) основного металла и металла шва реакторов ВВЭР-440 при АДС по различным технологическим вариантам

Сталь/проволока, нормативный документ, флюс	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
15Х2МФА (ТУ 5.961.1106–77)	0,13...0,18	0,17...0,37	0,3...0,6	2,5...3,0	0,6...0,8	0,25...0,35
15Х2МФА-А (Извещение № 4.80)	0,13...0,18	0,17...0,37	0,3...0,6	2,5...3,0	0,6...0,8	0,25...0,35
Св-10ХМФТ (ГОСТ 2246–70), флюс АН-42	0,07...0,12	≤ 0,35	0,4...0,7	1,4...1,8	0,4...0,6	0,20...0,35
Св-10ХМФТУ (ТУ 14-1-3034–80), флюс АН-42М	0,07...0,12	≤ 0,35	0,4...0,7	1,4...1,8	0,4...0,6	0,20...0,35

Окончание табл. 1

Сталь/проволока, нормативный документ, флюс	S	P	Cu	As	Ni	Прочие
	не более					
15Х2МФА (ТУ 5.961.1106–77)	0,025	0,025	0,30	0,08	0,4	0,025 Со
15Х2МФА-А (Извещение № 4.80)	0,015	0,012	0,10	0,01	0,4	0,025 Со
Св-10ХМФТ (ГОСТ 2246–70), флюс АН-42	0,030	0,030	0,25	–	0,3	0,05...0,12 Ti
Св-10ХМФТУ (ТУ 14-1-3034–80), флюс АН-42М	0,012	0,010	0,10	–	0,3	0,05...0,12 Ti



$T_{КО}$, для чего при испытании на ударной изгиб вместо образцов Менаже использовали образцы Шарпи.

Дальнейшее совершенствование технологии сварки кольцевых швов корпусов реакторов типа ВВЭР-440/213 было направлено на снижение температуры предварительного и сопутствующего подогрева с 350 до 150...200 °С. Усовершенствованную технологию широко использовали при изготовлении корпусов реакторов ВВЭР-440 на Ижорском заводе в бывшем СССР и заводе «Шкода» в ЧССР.

Сварку кольцевых швов реакторов типа ВВЭР-1000 из стали марки 15Х2НМФА-А (обечайки активной зоны толщиной 190 мм) и 15Х2НМФА (обечайки зоны патрубков толщиной 290 мм) первоначально осуществляли по двум технологическим вариантам, а именно АДС с использованием сварочной проволоки марки Св-10ХГНМА-А и флюса ФЦ-16 (или АН-17М), а также сварочной проволоки Св-08ХГНМТА и флюса НФ-18М. Оба технологических варианта в течение ряда лет применяли для сварки кольцевых швов промышленных реакторов этой модификации, поскольку они обеспечивали свойства и стабильный уровень содержания примесей (фосфор, сера, медь) и безопасную эксплуатацию в течение проектного срока его службы. На период изготовления реактора требования по прочностным характеристикам металла шва, выполненного способом АДС, составляли не менее 422 и 392 МПа (предел текучести) соответственно при температуре 20 и 350 °С, предела прочности — 539 и 490 МПа при тех же температурах, а критическая температура хрупкости должна быть не выше нуля. Содержание вредных примесей в металле шва первоначально ограничивали следующими значениями, мас. %: 0,15 Cu, 0,020 S, 0,025 P. После выполнения более 20 кольцевых швов по каждому из технологических вариантов был проведен статистический анализ рас-

пределения механических свойств [1], результаты которого показали преимущество сварочной проволоки Св-08ХГНМТА как по прочностным и пластическим характеристикам, так и по значению критической температуры хрупкости. Следует отметить, что при сварке по этому варианту содержание никеля в металле шва не превышало 1,5 мас. %, в то время как при другом варианте оно достигало 1,8 мас. %. Известно [2, 3], что более высокое содержание этого элемента отрицательно сказывается на радиационной стойкости материала и приводит к уменьшению ресурса корпуса реактора.

Учитывая, что при использовании сварочной проволоки Св-10ХГНМА-А уровень механических свойств металла был невысоким, ЦНИИТмаш для сварки кольцевых швов предложил сварочную проволоку марки Св-12Х2Н2МА-А в сочетании с флюсом ФЦ-16А (табл. 2). За счет увеличения содержания углерода и никеля в составе проволоки удалось обеспечить повышение прочностных свойств металла шва и обеспечить стабильно низкое значение $T_{КО}$. Это позволило использовать указанный вариант технологического процесса при изготовлении реакторов типа ВВЭР-1000 на Ижорском заводе и Атоммаше. Результаты исследований, выполненных в РИЦ «Курчатовский институт» [4], НИИАР [5] и ЦНИИ КМ «Прометей» [6] во время эксплуатации этих реакторов, показали, что коэффициент радиационного охрупчивания металла сварного шва при использовании новых сварочных материалов существенно выше, чем у основного металла — $A_F = 23$ при температуре 290 °С. При первоначальных вариантах с использованием проволоки Св-10ХГНМА-А и Св-08ХГНМТА в тех же условиях при той же температуре у металла шва $A_F = 20$. В связи с этим было решено отказаться от использования сварочной проволоки Св-12Х2Н2МА-А при сварке кольцевых швов обечайки активной зоны корпуса реактора.

Таблица 2. Требуемый химический состав (мас. %) стали и металла сварных швов реактора ВВЭР-1000

Сталь/сварочная проволока	Флюс	Нормативный документ	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	
15Х2НМФА	—	ТУ 108.765-78	0,13...0,18	0,17...0,37	0,30...0,60	1,7...2,4	1,0...1,5	0,50...0,70	$\leq 0,12$ (расч.)	—	
15Х2НМФА			0,13...0,16	0,17...0,37	0,30...0,60	1,8...2,3	1,0...1,5	0,50...0,70		0,10...0,12	—
15Х2НМФА-А			0,13...0,16	0,17...0,37	0,30...0,60	1,8...2,3	1,0...1,3	0,50...0,70		0,10...0,12	—
Св-08ХГНМТА Св-08ХГНМТА-ВИ	НФ-18М	ПНАЭ Г-7-010-89	0,06...0,10	0,15...0,45	0,45...1,10	1,2...2,0	1,0...1,5	0,40...0,70	—	0,01...0,06	
Св-10ХГНМА-А	ФЦ-16		0,06...0,12	0,15...0,45	0,65...1,10	1,2...2,0	1,2...1,8	0,40...0,70	—	—	
Св-12Х2Н2МА	ФЦ-16А		0,06...0,12	0,15...0,45	0,65...1,10	1,2...2,0	1,2...1,9	0,40...0,70	—	—	
Св-12Х2Н2МА-А	ФЦ-16А		0,06...0,12	0,15...0,45	0,65...1,10	1,4...2,1	1,2...1,9	0,45...0,75	—	—	
Св-08ХГНМТА-А	—	ТУ 14-1-1275-75	0,05...0,10	0,22...0,37	0,70...1,10	1,55...1,85	1,1...1,4	0,50...0,70	0,03	0,03...0,10	
Св-09ХГНМТА	—	ТУ 14-1-3675-01	0,07...0,11	0,17...0,30	0,80...1,05	1,60...1,90	1,0...1,3	0,50...0,70	0,03	0,05...0,11	
Св-09ХГНМТА-ВИ	—	ТУ 14-1-3675-01	0,07...0,11	0,17...0,30	0,80...1,05	1,60...1,90	1,0...1,3	0,50...0,70	0,03	0,05...0,11	
Св-09ХГНМТА	48НФ-18М	ТУ 5.965-11175-02	0,09	0,40	0,4...1,0	1,10...1,80	0,9...1,3	0,40...0,75	—	0,01...0,06	



Сталь/сварочная проволока	Флюс	Сертификат	Cu	S	P	As	Co	Sb	Sn	P+Sb+Sn
			не более							
15X2НМФА	—	ТУ 108.765–78	0,30	0,020	0,020	0,040	0,03	—	—	—
15X2НМФА			0,08	0,012	0,010	0,010	0,03	0,005	0,005	0,015
15X2НМФА-А			0,08	0,012	0,010	0,010	0,03	0,005	0,005	0,015
Св-08ХГНМТА Св-08ХГНМТА-ВИ	НФ-18М	ПНАЭ Г-7-010–89	0,15	0,020	0,025	—	—	—	—	—
Св10ХГНМА-А	ФЦ-16		0,15	0,020	0,025	—	—	—	—	—
Св-12Х2Н2МА	ФЦ-16А		0,15	0,020	0,025	—	—	—	—	—
Св-12Х2Н2МА-А			0,08	0,015	0,012	—	—	—	—	—
Св-08ХГНМТА-А	—	ТУ 14-1-1275–75	0,10	—	—	—	—	—	—	—
Св-09ХГНМТА	—	ТУ 14-1-3675–01	0,10	0,012	0,012	0,010	0,03	0,008	0,001	—
Св-09ХГНМТА-ВИ	—	ТУ 14-1-3675–01	0,06	0,006	0,006	0,010	0,02	—	—	—
Св-09ХГНМТА	48НФ-18М	ТУ 5.965-11175–02	0,10	0,015	0,012	—	—	—	—	—

К настоящему времени накоплены обширные данные [7] о механических свойствах металла швов, полученные в ходе испытаний образцов при изготовлении корпусов реакторов. После соответствующей статистической обработки этих данных можно судить о преимуществах того или иного сочетания сварочных материалов, а на основе полученных характеристик конструктивной прочности — о работоспособности и надежности оборудования в целом. В работе [1] проведена статистическая обработка результатов механических испытаний металла швов, выполненных при использовании первых двух технологических вариантов. Для описания результатов в этой работе применен закон нормального распределения случайной величины и приведены значения математического ожидания и дисперсии для каждого из параметров механической характеристики (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ), полученных при сварке различными сварочными материалами при 20 и 350 °С. В работе [8] выполнена статистическая обработка данных о механических свойствах металла шва при автоматической сварке проволокой Св-12Х2Н2МА-А под флюсом ФЦ-16А.

Сравнение математических ожиданий по t -критерию (критерию Стьюдента) показало, что при сварке проволокой Св-08ХГНМТА под флюсом НФ-18М имеет место существенное повышение оценки относительного сужения при температуре 20 °С, а при использовании проволоки Св-12Х2Н2МА-А и флюса ФЦ-16А — повышение значений σ_b и $\sigma_{0,2}$ при 350 °С. Результаты статистической обработки механических свойств металла швов, выполненных по трем технологическим вариантам, представлены на рис. 1 и 2.

Испытания на растяжение пятикратных образцов (рис. 1 и 2) проводили при 20 и 350 °С (штриховыми линиями показан требуемый уровень механических свойств согласно ПНАЭ Г-7-010–89 [9]). Преимущество сварки проволокой Св-12Х2Н2МА-А по сравнению с двумя остальными

вариантами при сопоставлении значений ударной вязкости по результатам испытаний образцов Ме-наже (КСУ) и Шарпи (КСV) очевидно. Требуемое по нормативным материалам [10] значение критической температуры хрупкости ($T_{КО} = 0$) для металла сварного шва обеспечивается при указанном технологическом варианте сварки с погрешностью 0,95. Исходя из такой важной характеристики, как сопротивление материала хрупкому разрушению, очевидно, что преимущество имеет сварка проволокой Св-12Х2Н2МА-А. Однако согласно данным работ [4, 6] повышенное содержание никеля в металле шва, полученном при сварке этой проволокой, приводит к более интенсивному его охрупчиванию в процессе эксплуатации реактора под действием нейтронного облучения.

В работе [6] с целью исследования влияния никеля на радиационное охрупчивание металла сварного шва рассмотрены две группы материалов, обеспечивающие различное содержание никеля в металле шва — от 1,1 до 1,36 и от 1,6 до 1,8 %. Первую группу сварных швов [6] выполняли автоматической сваркой проволоками Св-08ХГНМТА и Св-09ХГНМТА-ВИ под флюсами марок НФ-18М и КФ-30. При этом содержание никеля в наплавленном металле несущественно отличалось от допустимого для стали марки 15Х2НМФА-А (1,0... 1,3 мас. %) по ТУ 108.765–98, хотя в стали с более высоким содержанием примесных элементов, а именно марки 15Х2НМФА, содержание никеля может изменяться в более широких пределах (1,0... 1,5 мас. %). При выполнении сварных швов второй группы использовали сварочные материалы разработки ЦНИИТмаш (проволока Св-10ХГНМА-А под флюсом ФЦ-16 и Св-12Х2Н2МА-А под флюсом ФЦ-16А). В обоих случаях радиационное охрупчивание металла сварных швов оценивали по изменению критической температуры хрупкости и уровню энергии удара $E = 47$ Дж при испытании стандартных образцов Шарпи. Облучение образцов осуществляли в исследователь-

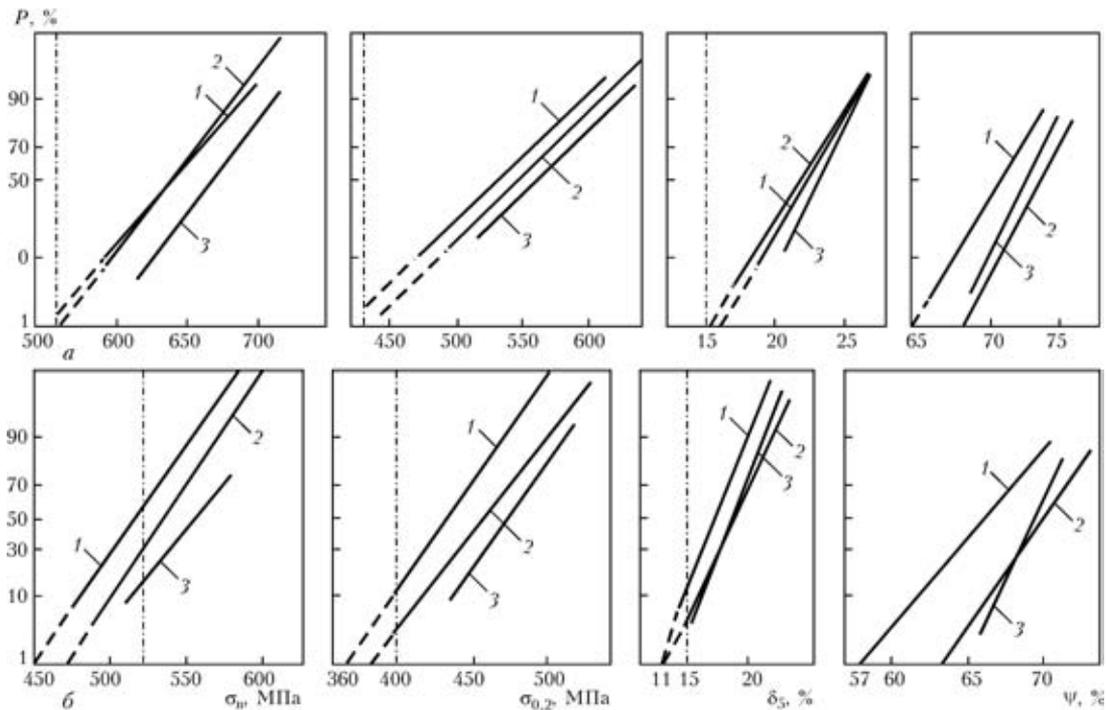


Рис. 1. Интегральные кривые распределения механических свойств металла швов при 20 (а) и 350 °С (б), полученных при сварке по различным технологическим вариантам: 1 – Св-10ХГНМА-А, флюсы АН-17М и ФЦ-16; 2 – Св-08ХГНМТА, флюс НФ-18М; 3 – Св-12Х2Н2МА-А, флюс ФЦ-16А (*P* – интегральная вероятность события)

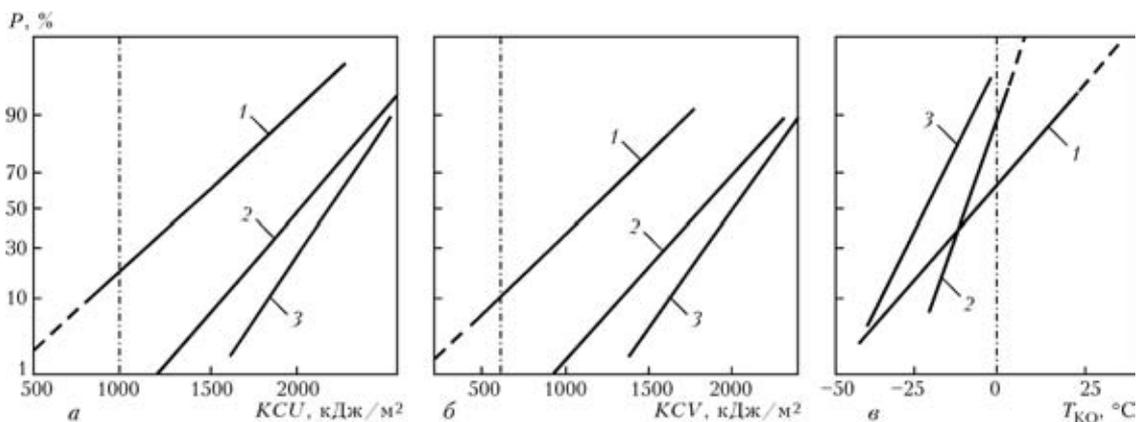


Рис. 2. Интегральные кривые распределения ударной вязкости по результатам испытаний образцов Менаже (а) и Шарпи (б), а также критической температуры хрупкости T_{K0} (в) в металле швов в исходном состоянии, полученных при сварке по различным технологическим вариантам

ских и промышленных реакторах до флюенса нейтронов $3 \cdot 10^{20}$ нейтр./см².

Результаты испытаний показали, что сдвиг критической температуры хрупкости за счет облучения для металла шва, в котором содержание никеля составляет не более 1,36 мас. %, а флюенс нейтронов не превышает проектный за полный срок службы 30 лет ($4,7 \cdot 10^{19}$ нейтр./см²), можно достаточно точно прогнозировать в соответствии с зависимостью (1.1), предложенной в «Нормах расчета на прочность» [10], при значении коэффициента радиационного охрупчивания $A_F = 20$. При более высоких значениях флюенса нейтронов экспериментальные значения ΔT_F больше расчетных, определенных по указанной зависимости. Так, при флюенсе нейтронов $1,7 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² это различие достигает 90 °С у металла сварных швов с довольно низким (до 1,36 мас. %) содержанием

никеля [6]. У металла швов с повышенным содержанием никеля (1,6... 1,8 мас. %) нормативная зависимость оказалась справедливой только до флюенса $2 \cdot 10^{19}$ нейтр./см². При большем флюенсе нейтронов характер зависимости (1.1) из работы [10] значительно отличается от полученной по экспериментальным данным для таких же материалов [6], поэтому исследователи нашли пути ее корректировки. Так, в работе [6] предлагается в уравнении (1.1) заменить показатель степени 1/3 на 1/2 и ввести дополнительные параметры, учитывающие в металле шва содержание не только никеля, но и примесных элементов.

Таким образом, несмотря на несколько бóльшую прочность и более низкую критическую температуру хрупкости в исходном состоянии металла швов, выполненных АДС проволокой Св-12Х2Н2МА-А под флюсом ФЦ-16А, для кольцевых



швов, соединяющих обечайки активной зоны корпуса реактора, предпочтительнее использовать сварочные материалы, разработанные в ЦНИИ КМ «Прометей». Так, металл шва, выполненного проволокой Св-08ХГНМТА под флюсом НФ-18М, отличается повышенной стойкостью к радиационному охрупчиванию.

Несмотря на то, что в настоящее время при проектировании новых энергетических установок с реакторами типа ВВЭР намечается тенденция к снижению максимального суммарного нейтронного потока на стенку реактора в течение проектного срока службы за счет использования прогрессивных конструктивных решений, проблема радиационного охрупчивания металла остается по-прежнему актуальной. Это связано с появившимися в последние годы сведениями о возможности значительного снижения сопротивления хрупкому разрушению сталей при облучении в течение длительного времени нейтронными потоками низкой плотности. Так, благодаря экспериментам, проведенным в России и за рубежом, установлено отрицательное влияние никеля в случае его содержания в металле более 1 мас. % на радиационную стойкость последней. Кроме того, в связи с увеличением проектного срока службы реактора с 30 до 60 лет одной из наиболее важных стала задача обеспечения тепловой хрупкости материала. Накопленный опыт показал, что тепловое охрупчивание даже при относительно низкой (до 350 °С) температуре может существенно влиять на безопасность при длительной эксплуатации. Так, с целью предотвращения охрупчивания теплоустойчивых хромомолибденовых сталей при отпуске и в процессе эксплуатации в материале должно быть ограничено содержание фосфора, олова, сурьмы, кремния и марганца. Ограничения этих примесей в металле шва учитываются критерием Брускато X:

$$X = (10P + 4Sn + 5Sb + As) / 100 \leq 15 \cdot 10^{-6},$$

а для основного металла — критерием Ватанабэ I:

$$I = (Mn + Si)(P + Sn) \cdot 10^4 \leq 150.$$

Для получения металла шва, отвечающего всем указанным выше требованиям, следовало разработать новые сварочные материалы. В связи с этим ЦНИИ КМ «Прометей» в конце 1990-х годов для автоматической сварки стали 15Х2МФА разработал сварочную проволоку марки Св-10ХЗГМФТА-ВП и флюс ФП-33, а для ручной электродуговой сварки той же стали — электроды марки ЭП-35 (на базе проволоки Св-10ХЗГМФТА-ВП). По сравнению с используемой ранее проволокой Св-10ХМФТУ в проволоке новой марки содержание молибдена увеличено с 0,4...0,6 до 0,6...0,8 мас. %, что позволило получить металл сварного шва равнопрочным основному металлу. Увеличение содержания хрома с 1,6...1,8 до 2,1...2,5 мас. % обеспечило получение металла литого шва с более вязкой структурой. Кроме того, для проволоки новой марки введены дополнительные ограничения по элементам, отрицательно влияющим на тепловое и нейтронное охрупчивание. Это дало возможность

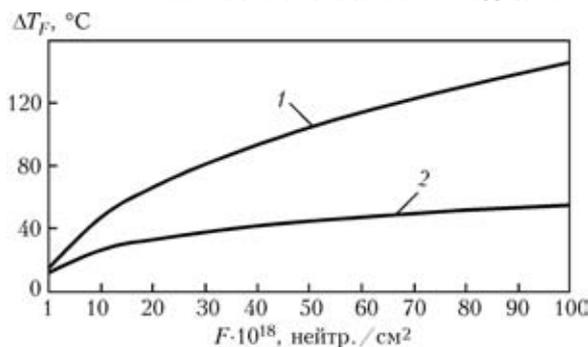


Рис. 3. Изменение расчетного значения сдвига коэффициента радиационного охрупчивания ΔT_F металла сварных швов с разной композицией легирования в зависимости от нейтронного облучения: 1 — проволока Св-09ХГНМТА-ВИ, флюс НФ-18М; 2 — проволока Св-10ХЗГМФТА-ВП, флюс ФП-33

получить металл сварного шва с ограниченным содержанием примесных элементов, а именно, мас. %: S ≤ 0,010, P ≤ 0,010, Sb ≤ 0,008, Sn ≤ 0,0010, As ≤ 0,0010, Cu ≤ 0,08. Отсюда расчетное значение коэффициента радиационного охрупчивания металла шва при температуре облучения 270 °С не превышает 12 (рис. 3). Изготовление проволоки марки Св-10ХЗГМФТА-ВП освоено промышленностью, она выплавляется на особо чистой шихте с применением вакуумно-индукционного и вакуумно-плазменного передела.

Отличительной особенностью флюса марки ФП-33 является меньшее содержание в нем таких активных оксидов, каким являются диоксид кремния и закись марганца, а также наличие диоксида титана. Это позволяет при сварке снизить интенсивность восстановления кремния и марганца в металле шва из флюса, что способствует повышению сопротивления тепловому охрупчиванию. Флюс указанной марки также освоен промышленностью и поставляется в соответствии с ТУ 5.965-11671-98. Высокие сварочно-технологические свойства флюса позволяют использовать его при сварке в узкую разделку с углом раскрытия свариваемых кромок 2°.

Результаты исследований сварных швов, выполненных указанными сварочными материалами как в лабораторных, так и промышленных условиях, показали, что металл шва после окончательной термической обработки по режиму высокого отпуска имеет высокий уровень прочностных и пластических характеристик. Так, гарантированное значение предела текучести при температуре 350 °С составляет не менее 420 МПа, а критическая температура хрупкости не превышает -20 °С. Исследование склонности к тепловому охрупчиванию металла шва данной композиции показало, что металл шва отличается низкой чувствительностью к тепловому охрупчиванию в случае длительной выдержки при температуре старения 350...550 °С. Это свидетельствует о высоком запасе его стабильности при длительном воздействии эксплуатационных температур. Изменения критической температуры хрупкости после длительных тепловых выдержек (до 20 тыс. ч) при температуре 350...450 °С практически не наблюдалось.



Из изложенного выше следует, что сварку кольцевых швов, расположенных в активной зоне корпуса реактора ВВЭР-1000, рекомендуется выполнять проволокой марки Св-08ХГНМТА под флюсом НФ-18М, поскольку при этом металл шва отличается наибольшей радиационной стойкостью. С целью увеличения расчетного и фактического срока службы корпуса реактора ВВЭР-1000 с 1995 г. введены дополнительные ограничения на содержание в проволоке Св-09ХГНМТА-ВИ никеля (1,3 мас. %) и следующих вредных примесей, мас. %: $S \leq 0,006$, $P \leq 0,006$, $Sb \leq 0,008$, $Sn \leq 0,0010$, $As \leq 0,0010$, $Cu \leq 0,06$. Содержание серы и фосфора во флюсе НФ-18М также снижено до 0,012 %. Кроме того, для сварки швов активной зоны предложено применять проволоку диаметром не более 4 мм при узкой разделке кромок свариваемых обечаек.

Для создания корпусов реакторов перспективных установок с более высокими показателями эксплуатационной безопасности, мощности и увеличенным в 1,5...2,0 раза ресурсом (до 60 лет и более) наиболее целесообразным представляется применение разработанной институтом в сотрудничестве с ОКБ «Гидропресс» и Ижорским заводом стали усовершенствованного состава марки 15Х2НМФА класса 0 и сварочных материалов проволоки Св-10ХЗГМФТА-ВП и флюса ФП-33. Эта марка стали является модификацией стали 15Х2МФА и содержит в своем составе не более 0,8 мас. % Ni.

1. Применение новых сварочных материалов для кольцевых швов на корпусах реакторов АЭС повышенной мощности

Results of the gained experience on improvement of steels and welding consumables, used in fabrication of WWER reactors of nuclear power stations are presented. Special attention is given to the problems of radiation and thermal embrittlement of the joints, influencing the safety of reactors at long-term operation

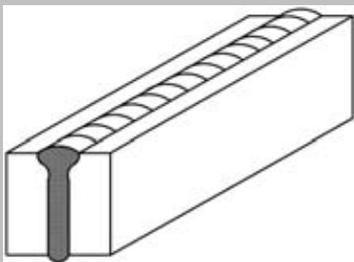
/ И. В. Горынин, В. А. Игнатов, Б. Т. Тимофеев, Ю. И. Шкатов // Автомат. сварка. — 1983. — № 10. — С. 38–42.

2. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов / Н. Н. Алексеев, А. Д. Амаев, И. В. Горынин, В. А. Николаев / Под ред. И. В. Горынина. — М.: Энергоиздат, 1981. — 192 с.
3. Конструкционные материалы АЭС / Ю. Ф. Баландин, И. В. Горынин, Ю. И. Звездин, В. Г. Марков. — М.: Энергоиздат, 1984. — 280 с.
4. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов / Под ред. А. М. Паршина, П. А. Платонова. — СПб.: Политехника, 1997. — 312 с.
5. Влияние никеля на радиационное охрупчивание стали 15Х2НМФАА / В. А. Цыканов, В. К. Шамардин, А. М. Печерин, Т. Н. Колесова // Проблемы материаловедения при изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС: Сб. аннотаций 5-й Междунар. конф., С.-Петербург–Пушкин, 7–14 июня 1998 г. — СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 1988. — С. 50–51.
6. Влияние никеля на радиационное охрупчивание основного металла и металла швов стали 15Х2НМФА-А / А. М. Морозов, В. А. Николаев, Е. В. Юрченко, В. Г. Васильев // Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС: Тр. 6-й Междунар. конф., г. С.-Петербург, 19–23 июня 2000 г. — СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2000. — Т. 2. — С. 372–396.
7. Анализ механических свойств сварных соединений корпусов водо-водяных аппаратов / А. С. Жеребенков, Ю. В. Соболев, Б. Т. Тимофеев, Т. А. Чернаенко // Вопр. судостроения. Сер. Сварка. — 1983. — Вып. 35. — С. 76–83.
8. Данаусов А. В., Тимофеев Б. Т. Сопоставление механических свойств металла кольцевых швов эксплуатирующихся реакторов ВВЭР-1000, выполненных по различным технологическим вариантам // Вопр. материаловедения. — 2000. — № 3. — С. 96–103.
9. ПНАЭ Г-7-010–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки: Правила контроля. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 135 с.
10. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.

Поступила в редакцию 03.11.2005

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРОГРАММИРОВАНИЕМ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЯ

Разработана технология сварки новых конструкционных материалов, удовлетворяющая высоким требованиям к качеству и прочности сварных соединений при использовании их в летательных аппаратах, криогенных установках или других высоконагруженных конструкциях.



Среди разнообразных технологических приемов электронно-лучевой сварки таких, как сварка сканирующим пучком, тандемная или с двойным преломлением пучка, сварка с программированием тепловложения в пределах контура развертки пучка занимает особое место. Она открывает перед исследователями или технологами принципиально новые возможности активного управления размерами и формой зоны проплавления, предотвращения образования корневых дефектов или структурной неоднородности, повышения стойкости к образованию горячих трещин и пор в металле шва, обеспечения стабильных показателей прочности как в пределах сварного соединения, так и в сечении при сварке заготовок большой толщины.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 7
Тел.: (38044) 287-44-06; факс: (38044) 287-12-83; 287-46-30