

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Шубина Олега Владимировича «Разработка технологии сварки корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА, обеспечивающей повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.8 «Сварка, родственные процессы и технологии» (технические науки)

### Актуальность диссертационной работы.

Корпус водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) является несменяемым элементом ядерной установки, во многом определяющим срок эксплуатации атомных электростанций. Общепринятым условием обеспечения безопасной эксплуатации корпуса реактора является обеспечение целостности по критерию сопротивления хрупкому разрушению всех его элементов во время эксплуатации.

Диссертационная работа Шубина О.В. посвящена актуальным вопросам повышения эффективности технологии сварки корпусов ВВЭР. При этом предлагаемая технология сварки гарантирует повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов. Рассматриваемые в работе тематика является перспективной не только для атомной энергетики, но и для других отраслей промышленности.

### Общая характеристика диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по всем главам и работе в целом, заключения, списка использованной литературы, приложения (акты внедрения). Объем диссертационной работы составляет 206 страниц текста, включая 99 рисунков и 26 таблиц. Список литературы содержит 180 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены описание устройства корпуса ВВЭР, изложена последовательность основных технологических операций при изготовлении корпуса реактора (КР), приведены требования к основному материалу корпуса, описан эволюционный путь развития материалов, применяемых для автоматической сварки под флюсом, описано воздействие эксплуатационных факторов на свойства материалов КР. На основе статистического анализа свойств металла шва и сварных соединений при изготовлении оборудования КР показано, что применяемые сварочные материалы и технология сварки делают

НИИ «Курчатовский институт»	
Федеральное государственное учреждение «Физико-энергетический институт»	
№ 536/2026/28/34	
ДСУ	«5» 02 2026 г.
Осн.	5 л.
Прил.	1 л.
№	_____
подп.	_____

задачу обеспечения требуемого значения критической температуры хрупкости (не выше минус 15°С для металла шва) трудно достижимой.

Вторая глава посвящена выбору методик исследований, использованных для решения поставленных научных задач: выбору оборудования и технологии сварки, термической обработки и неразрушающего контроля, определения химического состава, механических свойств, характеристик сопротивления хрупкому разрушению (СХР), твердости, металлографических, дилатометрических и фрактографических исследований металла шва и сварного соединения.

Третья глава посвящена исследованию причин снижения исходной критической температуры металла шва КР из стали 15Х2НМФА. По результатам анализа испытаний сварных швов состава 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo было установлено, что во всех случаях при содержании кремния в составе металла шва 0,41% и выше, критическая температура хрупкости имеет повышенные значения. Было установлено, что повышение сварочного тока, температуры подогрева и скорости сварки отрицательно влияет на ударную вязкость и критическую температуру хрупкости металла шва. Также показан отрицательный эффект от замены менее активного плавящего флюса НФ-18М на более активный флюс ФЦ-16А. По результатам дилатометрических исследований были разработаны рекомендации к технологическим параметрам сварки с точки зрения снижения структурной неоднородности. Было установлено, что скорость охлаждения в интервале наименьшей устойчивости аустенита должна быть не ниже 2 °С/с для обеспечения структурной однородности. Также был установлен эффект снижения ударной вязкости металла шва (с системой легирования 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo) при промежуточном отпуске 620 °С продолжительностью свыше 10 ч, независимо от содержания в нем кремния, что объясняется с процессами преобразования в карбидной фазе. Последующий окончательный отпуск устраняет данный эффект не полностью. Для компенсации данного эффекта было рекомендовано ограничить количество промежуточных отпусков сварных соединений (не более двух).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния параметров режимов сварки на сварочно-технологические свойства, химический состав, структуру и механические свойства металла шва (системы легирования Cr-Ni-Mo) при сварке под флюсом. Представлены результаты экспериментальных исследований с применением постоянного тока и переменного тока. Показано, что применение переменного тока, в сравнении с постоянным током обратной полярности, позволяет снизить содержание кислорода в наплавленном металле, что приводит к повышению ударной вязкости. Снижение содержания кислорода объясняется

снижением интенсивности кремний-восстановительного процесса, что подтверждается снижением содержания кремния в металле шва на ~0,1 % в случае использования переменного тока. Также установлено, что наиболее предпочтительным с точки зрения обеспечения высоких значений ударной вязкости наплавленного металла является применение переменного тока с прямоугольной формой импульса частотой 50 Гц, балансом 50 % без смещения импульсов по напряжению и току.

В пятой главе представлены результаты исследований металла шва и сварных соединений, выполненных с применением низкоактивного агломерированного сварочного флюса взамен плавного. При этом показано, что снижение СХР металла шва стали 15Х2НМФА во многом обусловлено высоким содержанием кислорода, присутствующего в виде неметаллических включений, являющихся очагами хрупкого разрушения. Отражено, что химическая активность флюса характеризует его окислительную способность при взаимодействии с расплавленной металлической фазой. Установлено, что металл шва, выполненный с применением проволоки марки Св-09ХГНМТАА-ВИ в сочетании с агломерированным флюсом марки 48АФ-71, имеет низкую склонность к термическому старению ( $\Delta T_T = 0^\circ\text{C}$ ), что позволяет рекомендовать данное сочетание сварочных материалов для изготовления корпуса реактора с исключением разрушения его сварных соединений по хрупкому механизму в процессе эксплуатации вследствие влияния длительного воздействия рабочей температуры.

#### **Научная новизна и практическая значимость работы.**

Представленная на отзыв работа обладает научной новизной: установлено, что снижение скорости охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита 800-500 $^\circ\text{C}$  менее 2 $^\circ\text{C}/\text{с}$  является причиной структурной неоднородности металла шва – образования участков структурно-свободного феррита в бейнитной матрице, что приводит к снижению ударной вязкости металла шва ниже критериального значения 59 Дж/см<sup>2</sup> при температуре минус 15 $^\circ\text{C}$ ; выявлено снижение ударной вязкости металла шва состава 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo после промежуточного отпуска при температуре 620  $^\circ\text{C}$  продолжительностью свыше 10 ч, что связано с процессом ослабления когезивной прочности границ зерен из-за образования на них специальных легированных карбидов типа Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> и MoC; выявлена закономерность снижения сопротивления хрупкому разрушению за счет повышения содержания в металле шва кислорода свыше 0,04 %, входящего в состав неметаллических включений, при протекании кремний-восстановительного процесса на стадии взаимодействия жидкой шлаковой и металлической фаз; установлено, что сварка под флюсом модулированным переменным током, в сравнении с постоянным током обратной полярности,

позволяет снизить критическую температуру хрупкости металла шва до минус 25 °С за счет снижения содержания в нем кислорода с 0,04 % до 0,02 %; предложен и научно обоснован метод снижения критической температуры хрупкости металла шва стали 15Х2НМФА до гарантированного значения минус 35°С за счет применения низкоактивного агломерированного сварочного флюса; установлена корреляционная зависимость между референсной температурой  $T_{100}$  ( $T_0$ ) и критической температурой хрупкости  $T_{K0}$  для 1,5%Cr-1%Ni-0,5%Mo металла шва, выполненного по предлагаемой технологии:  $T_{100}(T_0) = T_{K0} - 29,1$  °С.

Диссертационная работа имеет практическую значимость: технологические параметры автоматической сварки под флюсом корпуса реактора из стали 15Х2НМФА, обеспечивающие соответствие сопротивления хрупкому разрушению металла шва требованиям конструкторской документации, внесены в производственно-технологическую документацию завода «Атоммаш» при изготовлении оборудования экспортных блоков АЭУ; проведены аттестационные испытания нового сочетания сварочных материалов – сварочной проволоки марки Св-09ХГНМТАА-ВИ и низкоактивного агломерированного флюса марки 48АФ-71, обеспечивающего повышение СХР металла сварных швов до уровня требований к заготовкам основного металла – стали 15Х2НМФА.

Основные результаты работы в необходимом и достаточном количестве опубликованы в журналах из перечня ВАК, а также индексируемых базами Scopus и WoS. Основные результаты работы широко представлены на международных научно-технических конференциях, форумах и семинарах.

**В качестве замечаний и недостатков, представленной на отзыв работы, следует отметить:**

1. В пункте 2.1 «Оборудование и методика сварки» (стр. 46) указано, что «Измерение межваликовой температуры проводили непосредственно в разделке перед выполнением каждого валика». Однако, остается не ясным, каким способом в данном случае измерялась температура?

2. В работе (стр. 76) указано «Снижение уровня ударной вязкости объясняется, по-видимому, повышением количества кислорода, присутствующего в металле шва...». Однако, для более полного обоснования предлагаемого применения флюса с меньшей химической активностью, все-таки целесообразно было бы экспериментально определить содержание кислорода в металле сварного шва. Либо провести аналитическую оценку.

3. Более полная картина тепловых процессов при сварке была бы при наличии не только расчетов по классической теории, а при сопоставлении с экспериментальными данными. Также при сравнении процессов на постоянном и переменном токе целесообразно было бы численно оценить ширину зоны

термического влияния (особенно участков неполного расплавления и перегрева). Также дополнительная экспериментальная оценка термического цикла процесса позволила бы данным, представленным на рис. 3.29 (стр. 92), быть более информативными. И, возможно, объяснялось бы утверждение о том, что «... твердость ЗТВ монотонно снижается...» (стр. 93).

4. Из таблицы 4.1 (стр. 103) не ясно, на основе каких принципов выбиралось варьирование факторов (режимы сварки)? Как выбирался шаг изменения параметров процесса сварки (наплавки)? Исследования проводились на основе планирования многофакторного эксперимента? Была ли оптимизация параметров режимов сварки?

5. Неоспоримая практическая ценность диссертационной работы, представленной на отзыв, была бы еще значимее при наличии патента РФ на изобретение (полезную модель).

Диссертация Шубина О.В. на тему: «Разработка технологии сварки корпусов ВВЭР из стали 15Х2НМФА, обеспечивающей повышение сопротивления хрупкому разрушению металла сварных швов» выполнена на высоком научном уровне, содержит достаточный объем новых экспериментальных данных, практически значима, является законченной работой, содержащей решение актуальной научной и производственной задачи. Диссертационная работа соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24.09.2013, № 842, а её автор, Шубин Олег Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.8 – «Сварка, родственные процессы и технологии».

Официальный оппонент

Зернин Евгений Александрович

Степень, звание: кандидат технических наук по специальности

05.03.06 «Технологии и машины сварочного производства», доцент

Должность: заведующий кафедрой сварки судовых конструкций

Место работы: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

Адрес: Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3

Телефон: +7 (812) 494-09-39

e-mail: zernin@smtu.ru

Подпись Е.А. Зернина заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета СПбГМТУ



И.В. Добряк

Озмюкманен 05.03.2026г