

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК: 621.791.754.4

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ФЛЮСА И ФОРМИРУЮЩИХ
ПОДКЛАДОК НА СТРУКТУРУ КОРНЕВОГО ШВА ПРИ
ОДНОСТОРОННЕЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ**

© 2016 г. Ю.В. Доронин*, А.Ю. Доронин**

* ООО «Аттестационный центр городского хозяйства» (АЦГХ), Москва, Россия

** Государственный научный центр «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия

Электродуговая сварка борсодержащих сталей в изделиях ответственного назначения сопряжена, как известно, с серьезными затруднениями, вызванными красноломкостью основного металла. Разработан приемлемый вариант автоматической сварки для ферритной хромистой коррозионностойкой низкоуглеродистой стали 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш) под керамическим флюсом с применением подкладной ленты марки ЛФС. Сталь применяется в качестве нейтронопоглощающего материала для изготовления в бассейнах выдержки стеллажей хранения облученного ядерного топлива (ОЯТ) с содержанием урана U-235 < 5%. Показано, что в металле шва хорошо сочетаются структурный и фазовый составы матрицы и неметаллических включений, соотношения титан-бор и титан-бор-хром более благоприятны, чем для основного металла, за счёт применения керамического флюса. Применение подкладных материалов, по-видимому, позволило снизить напряжённость сварного узла и избежать трещинообразования в процессе сварки.

Ключевые слова: борсодержащая нейтронопоглощающая сталь, автоматическая сварка под флюсом, подкладная лента, керамический флюс, боридная эвтектика, шлаковая система.

Поступила в редакцию 15.12.2016

При односторонней дуговой сварке плавящимся электродом принудительное формирование корня шва обеспечивается флюсовыми подушками, флюсо-медными и керамическими подкладками, гибкими флюсовыми лентами. При сварке на весу корневой шов успешно формируется с помощью специальных программ процессов STT, Wise Root, Steel Root и др.

Известны работы, выполненные в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством А.М.Рыбачука по воздействию магнитных полей на форму корневого шва, способных создать практически идеальный обратный валик на толщинах до 8 мм, при сварке неплавящимся электродом.

Положительных результатов при сварке корневых швов кольцевых стыков трубопроводов металлопорошковой проволокой достигли авторы [1]. Уникальная шлаковая система обмазки электрода LB-52U обеспечивает качественный обратный валик при ручной дуговой сварке. Ответственными за геометрические параметры обратного валика шва внутри шлаковой системы являются физические (Тпл. и Ттв.) и физико-химические (вязкость, поверхностное и межфазное натяжения) свойства расплавленного шлака. Подробно влияние физико-химических свойств в сварочных процессах применительно к формированию корня шва освещено в работах [2, 3].

Однако, по-прежнему, неблагоприятная структура металла корня шва является одной из основных причин возникновения дефектов при односторонней дуговой сварке. И если шов не легируется рядом элементов через металлпорошковую проволоку, то, как правило, либо насыщен газами (STT-процесс), либо имеет крупнозернистую структуру после сварки на керамических подкладках или пересыщен шлаковыми включениями в случае использования формирующих корень флюсов, имеющих низкую температуру плавления.

В настоящее время отсутствуют исследования по оценке возможного влияния подкладных устройств или сварочной оснастки на формирование и структуру корня шва изделий ответственного назначения. Не исследована возможность получения мелкозернистой структуры за счет тепломассопереноса в корневой части шва и за счет протекания металлургических реакций восстановления за счёт вводимых в корень шва легирующих элементов. Это особенно актуально при оценке металлургической свариваемости коррозионностойких сталей ферритного класса из-за возможного появления дефектов и снижения механических свойств сварных соединений.

Как известно, для изготовления стеллажей хранения облучённого ядерного топлива (ОЯТ) бассейнов выдержки применяются стали с высоким содержанием бора. При содержании в ОЯТ урана U-235 < 5% в качестве поглотителя нейтронов применяется ферритная хромистая коррозионностойкая низкоуглеродистая сталь 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш). В качестве нейтронопоглощающего легирующего элемента (а не микропримеси) выступает бор с марочным весовым содержанием 1,0...2,0%.

В процессе исследования и создания варианта односторонней сварки чехлов стеллажей из этой стали были проверены ряд технологий электродуговой сварки

– в активных и инертных газах, под флюсом, плазменная сварка, ручная дуговая сварка.

Положительные результаты были получены только при сварке под флюсом с применением подкладной ленты марки ЛФС [4]. В этом случае в сварных соединениях не были обнаружены внутренние и поверхностные трещины, а структура металла шва была мелкозернистой без признаков внутренних дефектов с удовлетворительным формированием корня шва.

Автоматическая сварка контрольных сварных соединений выполнялась под керамическим флюсом в сочетании с проволоками Св-03X19H60M15 и Св-01X12H2 (ЭП792-ВИ). Химический состав основного металла и применявшихся сварочных проволок приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав применяемых материалов

Материал	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	B	V	S	P
Сталь 04X14T3P1Ф-Ш	0.028	0.37	0.27	14.35	0.25	2.9	1.5	0.23	0.005	0.009
Сварочная проволока Эп-792-ВИ	0.004	0.32	0.60	12.82	2.06	-	-	-	0.007	0.008
Сварочная проволока Св-03X19H60M15	0.010	0.11	1.49	19.25	осно -ва	0.07	Мо		0.002	0.006
							14.57			

Проволока марки Св-01Х12Н2 (ЭП792-ВИ) должна обеспечить состав металла шва близкий к основному металлу, а проволока Св-03Х19Н60М15 состав металла сварного шва, позволяющий обеспечить его более высокую пластичность. Необходимо отметить, что металл сварного шва, выполненный сварочной проволокой марки Св-03Х19Н60М15 имеет ориентированную дендритную структуру, рис. 1, в то время как структура металл сварного шва, полученного с использованием проволоки марки и ЭП792-ВИ более фрагментирована на крупные структурные элементы. Зона термического влияния при сварке с использованием проволоки марки ЭП792-ВИ более протяжённая, что может быть вызвано повышенным тепловложением при использовании указанной проволоки. В целом структура металла шва имеет более предпочтительный характер по сравнению с основным металлом, особенно, зоной сплавления, рисунок 2.



Рис. 1. – Микроструктура металла сварного шва, сталь 04Х14ТЗР1Ф-Ш.
Сварочные материалы – проволока Св-03Х19Н60М15 + керамический флюс

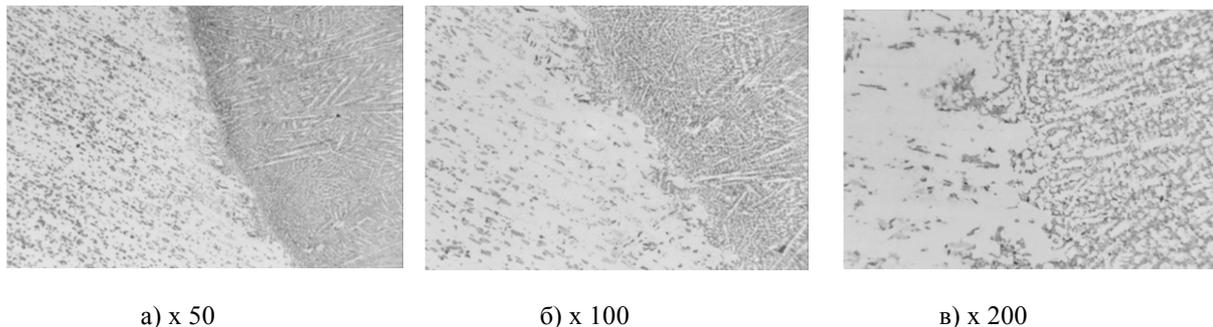


Рис. 2. – Микроструктура металла околошовной зоны, сталь 04Х14ТЗР1Ф-Ш.
Сварочные материалы – проволока Св-03Х19Н60М15 + керамический флюс

Анализ литературных данных показывает, что увеличение содержания бора больше 0,003...0,007 вес.% [5] однозначно приводит к ухудшению металлургической и тепловой свариваемости любой борсодержащей стали. Более высокое содержание бора ведёт к красноломкости, вследствие образования легкоплавкой феррито-боридной эвтектики – (δ – феррит + $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$), что и является основной причиной затруднений при сварке, особенно, электродуговой. Кроме того, как в основном, рисунок 3, так и в наплавленном металле образуются хрупкие неметаллические включения типа железохромистых боридов $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$, с титаном – $(\text{Ti}, \text{Cr})_2\text{B}$ и диборидов TiB_2 , существенно снижающих пластичность, вязкость и трещиностойчивость обогащенного хромом матричного δ - феррита в условиях термомеханического цикла сварки (ТДЦС).

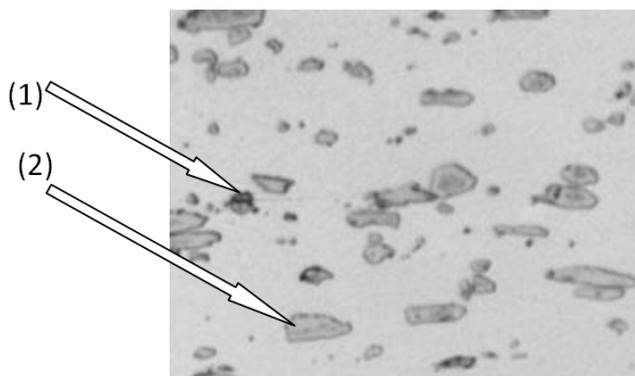


Рис. 3. – Неметаллические включения в основном металле; (1) – с титаном типа TiB_2 и $(Ti, Cr)_2B$; (2) – типа $(Fe, Cr)_2B$

В работе [6] показано, что для достижения приемлемой пластичности литого и горячекатаного металла нейтронпоглощающих сталей соотношение Ti/V должно быть не менее 2,7. В этом случае происходит измельчение зерна, уменьшение размеров боридов и образование вместо охрупченных боридов $(Fe, Cr)_2B$ более благоприятных неметаллических включений, содержащих титан и ванадий. По этой причине критически важно иметь общее содержание бора в металле шва в пределах марочного состава стали при указанном соотношении Ti/V . В российских разработках это соотношение рекомендовано в пределах 1,7...2,05 [7], что вероятно, не достаточно для полного исключения появления боридных эвтектик. При этом на металл шва накладывается обязательное условие равномерности распределения бора по всему сечению металла шва и зоны сплавления по условию сохранения коэффициента подкритичности $K_{эфф}$ защитной конструкции не менее заданного уровня 0,95, что обеспечивает требуемый уровень ядерной безопасности стеллажей.

Равномерность распределения бора гарантируется его достаточно полным исключением из эвтектической кристаллизации, что достигается при соотношении титан-бор-хром $(Cr - 5(B - Ti/2)) \geq 14,0$. Ti , обладая большим химическим сродством, образует с бором борид титана TiB_2 , температура плавления которого составляет $2800^\circ C$, тем самым выводя его из зоны эвтектической реакции. Кроме того, титан, образуя бориды, а также карбиды и нитриды, способствует сохранению хрома в металлической матрице, тем самым обеспечивая заявленные коррозионные характеристики стали.

Ввиду отсутствия в сварочных проволоках легирование металла шва бором осуществлялось за счет флюса, к которому предъявляются следующие основные требования:

- флюс должен обладать низкой химической активностью по отношению к металлу сварного шва – не более 0,25-0,35 – для предотвращения выгорания легирующих элементов;

- шлаковая система флюса для сварки должна обеспечивать хорошее формирование наплавленного металла, самопроизвольную отделимость шлаковой корки, плавное сплавление валика с поверхностью свариваемого металла при однопроходной сварке без разделки кромок, предотвращающее образование подрезов и других дефектов;

- приемлемое формирование обратной стороны сварного шва как при сварке на флюсовой подушке, так и при сварке на специальных подкладках;

Опыт отечественных и зарубежных разработчиков керамических флюсов, показал, что химическая активность оксидов TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , существенно ниже по

сравнению с SiO_2 , поэтому для сварки под флюсом высокохромистых сталей наиболее предпочтительны следующие шлаковые системы:

- $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$;
- $\text{MgO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$;
- $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$;
- $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$.

Следует отметить, что флюс, используемый, для односторонней сварки, должен обеспечивать повышенную глубину проплавления, что достигается, в основном, за счет физико-химических свойств шлаковой системы. В результате проведенных исследований установлено, что наилучшими сварочно-технологическими характеристиками обладают сварочные флюсы на базе шлаковой системы $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. В связи с изложенным, дальнейшие исследования по разработке технологии автоматической сварки стали марки 04X14ТЗР1Ф-Ш (ЧС-82Ш) проводились с использованием керамического флюса на основе $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Амфотерный Al_2O_3 , частично замещающий оксид кремния, обладая комплексобразующими свойствами и, в то же время, менее химически активен, по сравнению с SiO_2 .

Контроль сварки рентгеновским просвечиванием подтвердил высокое качество стыковых соединений при односторонней сварке стали 04X14ТЗР1Ф-Ш (ЧС-82Ш), выполненных как на «флюсовой подушке», так и с применением керамических подкладных лент. Односторонняя сварка с использованием керамического флюса показала практически полное отсутствие дефектов. В сварном шве не обнаружены шлаковые включения, поры, трещины. На рентгеновских снимках, рисунок 4, выявлены только технологические дефекты, а именно: неполное проплавление, что связано с отступлением от оптимальных режимов сварки [4].

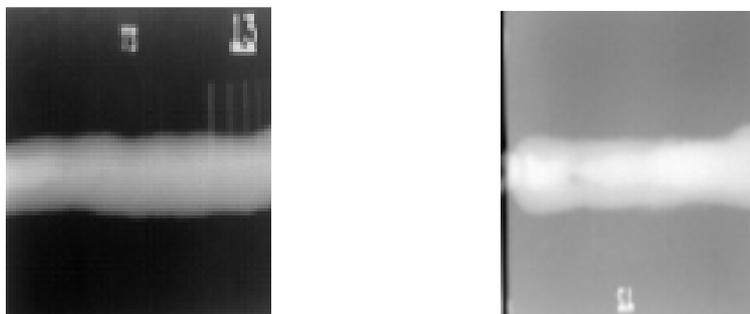
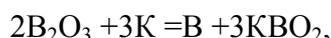


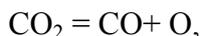
Рис. 4. – Рентгенограммы сварных соединений

Одновременно, исследовалась возможность переноса бора в металл шва из шлака формирующего слоя подкладной ленты, имеющей в своём составе до 10% оксида бора B_2O_3 , кроме оксидов Al, Si и других металлов. Эксперименты проводились на образцах из стали 09Г2 при ручной дуговой сварке корневых швов трубопроводов с использованием гибких лент марки ЛФС и на весу. Сравнительный анализ показал, что в корневом шве имеется до 0,01..0,003% бора, что существенного влияния на микроструктуру металла корневого шва не оказало. По всей видимости, восстановление бора и попадание его в шов из оксидов расплавленного шлака ленты шло по реакции:



где калий в виде оксида имеется в составе формирующего слоя подкладки, либо по реакции между оксидом бора и CO, образовавшегося в результате возгонки

замастителем – парафина, покрывающего нити стекловолоконной ленты, либо из защитного газа CO₂ в результате разложения под действием температуры сварочной дуги или сварочной ванны по реакции:



что, однако, не исключает, что в дальнейших исследованиях легирование шва через подкладку вполне допустимо.

ВЫВОДЫ

1) При односторонней сварке под флюсом хромистой коррозионно-стойкой нейтронопоглощающей стали ферритного класса 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш) с содержанием бора в пределах 1,0...2,0%, легирование металла шва осуществляется за счет ферробора, введенного в состав керамического флюса.

2) Разработанный вариант односторонней автоматической сварки чехлов стеллажей хранения (ОЯТ) бассейнов выдержки обеспечивает приемлемую технологическую свариваемость при условии применения «флюсовой подушки» и керамических подкладных лент для заданных сочетаний сварочных материалов.

3) При АСФ в металле шва удачно сочетаются структурный и фазовый состав матрицы и неметаллических включений, соотношения титан-бор и титан-бор-хром более благоприятны, чем для основного металла, за счёт применения керамического флюса.

4) Применение подкладных материалов, по-видимому, позволило снизить напряжённость сварного узла и избежать трещинообразования в процессе сварки.

5) Гибкие подкладные ленты марки ЛФС алюмо-боро-силикатного состава с содержанием В₂O₃ ≥ 5% в процессе активного теплового воздействия со стороны расплавленного металла сварочной ванны влияния на химический состав металл шва не оказывают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорошенко, Ф.Е. и др.* Технологические особенности выполнения различных слоев шва при автоматической сварке трубопроводов [Текст] / Ф.Е. Дорошенко и др. // Сварка и диагностика. – 2014. – №6. – С. 45–49.
2. *Доронин, Ю.В.* Разработка теоретических основ формирования обратной стороны шва с учетом физико-химических процессов в сварочной ванне и создание новых сварочных материалов для односторонней дуговой сварки плавящимся электродом: дисс. доктора техн. наук [Текст] Ю.В. Доронин. – М., 2010. – 352 с.
3. *Березовский, В.М.* Оптимизация формы шва при непрерывном проплавлении без подкладки [Текст] / В.М. Березовский // Сварочное производство. – 1988. – №3. – С. 29–31.
4. *Волобуев, Ю.С. и др.* Оптимизация технологии односторонней сварки опытных образцов сталей аустенитно-ферритного класса с использованием керамического флюса ФКБ-4 [Текст] / Ю.С. Волобуев, Ю.В. Доронин, А.Ю. Доронин // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – №1. – С. 40–53.
5. *Гудремон, Э.* Специальные стали. Т.1, II: Пер. с нем. – М.: Металлургиздат, 1959. – 1638 с.
6. He L., Liu Y., Li J., Li B. *Materials and Design*, 2012, Vol. 36, pp. 88 – 93.
7. Патент №2434969. Россия. Коррозионно-стойкая сталь с повышенной нейтронной поглощаемостью. [Текст] / В.С. Дуб, А.В. Дуб и др. – №2011110286/02; заяв. 18.03.11; опуб. 27.11.11, Бул. №33. – 6 с.

REFERENCES

- [1] Doroshenko F.E. etc. *Tekhnologicheskie osobennosti vypolneniia razlichnykh sloev shva pri avtomaticheskoi svarke truboprovodov* [Technological features of performance of seam various layers during automatic welding of pipelines]. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2014, №6, ISSN 2071-5234, pp. 45–49. (in Russian)

- [2] Doronin Yu.V. Razrabotka teoreticheskikh osnov formirovaniia obratnoi storony shva s uchetom fiziko-khimicheskikh protsessov v svarochnoi vanne i sozdanie novykh svarochnykh materialov dlia odnostoronnei dugovoi svarki plaviashchimsia elektrodom [Development of theoretical bases of seam reverse side formation taking into account physical and chemical processes in a welding bathtub and creation of new welding materials for unilateral arc welding by the melting electrode]: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Doctor of Technical sciences thesis]. M. 2010. 352 p. (in Russian)
- [3] Berezovskii V.M. Optimizatsiia formy shva pri nepreryvnom proplavlenii bez podkladki [Optimization of a form of a seam at unlined continuous pro-melting]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Fabrication], 1988, №3. ISSN 0491-6441, pp. 29–31. (in Russian)
- [4] Volobuev Yu.S., Doronin Iu.V., Doronin A.Yu. Optimizatsiia tekhnologii odnostoronnei svarki opytnykh obraztsov stalei austenitno-ferritnogo klassa s ispolzovaniem keramicheskogo fliusa FKB-4 [Optimization of unilateral welding technology of prototypes of austenitic and ferritic class steel with use of ceramic gumboil of FKB-4]. Globalnaia iadernaia bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, №1, ISSN 2304-414X, pp. 40–53. (in Russian)
- [5] Gudremon E. Spetsialnye stali [Special rolled steel bar]. Vol. I, II: Perevod s nemetskogo [Translated from German]. M. Pub. Metallurgizdat [Metallurgizdat], 1959. 1638 p. (in Russian)
- [6] He L., Liu Y., Li J., Li B. Materials and Design, 2012, Vol. 36, pp. 88–93. (in English)
- [7] Dub V.S., Dub A.V. etc. Patent №2434969. Rossiia. Korrozionno-stoikaia stal s povyshennoi neitronnoi pogloshchaemosti. №2011110286/02; zaiavka 18.03.11; opublikovano 27.11.11, Biulleten №33 [Patent № 2434969. Russia. Stainless steel with the increased neutron absorptivity. application 18.03.11; it is published 27.11.11, Bulletin №33]. 6 p. (in Russian)

Metallurgical, Physical and Chemical Features of Influence of Gumboil and Forming Linings on the Root Seam Structure at Unilateral Arc Welding

Yu.V. Doronin *, A.Yu. Doronin**

* LTD «Certification Center of municipal services», 47A Izmajlovskoe St. (schosse),
Moscow, Russia 105187

** State Research Centre “CNIITMASH”,
Sharikopodshipnikovaya St., 4, Moscow, Russia 115088
e-mail: doronin-45@mail.ru

Abstract – Arc welding boron-containing steel is accompanied by the serious difficulties caused by metal red-short. The acceptable option of automatic welding is developed for ferritic chromic stainless low-carbon steel 04H14T3R1F-Sh (ChS-82Sh) under ceramic gumboil with the use of LFS lining tape. Steel is applied as neutron-absorbing material for production in cooling ponds storage racks of the irradiated nuclear fuel (INF) with the content of uranium U-235 < 5%. It is shown that in metal of a seam structural and phase structures of a matrix and nonmetallic inclusions are well combined, ratios titanium-boron and titanium-boron-chrome are more favorable than for the main metal due to application of ceramic gumboil. Use of lining materials has allowed to reduce tension of welded knot and to avoid formation of cracks during the welding.

Keywords: boron-containing neutron-absorbing steel, automatic welding under gumboil, lining tape, ceramic gumboil, boron eutectic, slag system.