

рении, чем эталон, наоборот, при $\varepsilon_v > 1$ топливо более прочное, чем выбранный эталон с примерно одинаковой газифицирующей способностью.

Выводы. Изготовлена лабораторная установка, которая позволяет определять прочность твердого топлива в условиях, аналогичных для шахтных печей малого и большого диаметра. Получены выражения для определения критериев прочности и газификации твердого топлива. Американо-русский деловой союз наградил СибГИУ международной наградой – золотой медалью “Innovations for investments” и дипломом за разработанную лабораторную установку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 96963 РФ, МПК G 01 № 1/18. Лабораторная установка для исследования прочности твердого топлива / Селянин И.Ф.,

Феоктистов А.В., Куценко А.И. и др. Заявл. 22.03.2010. Оpubл. 20.08.2010 // Изобретения. Полезные модели. № 23.

2. Пат. № 99616 РФ, МПК G 01 № 33/22. Лабораторная установка для исследования прочности твердого топлива / Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Куценко А.И. и др. Заявл. 22.03.2010. Оpubл. 20.11.2010. // Изобретения. Полезные модели. № 32.
3. Пат. № 102386 РФ, МПК G 01 N 1/18. Установка для определения прочности твердого топлива / Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Куценко А.И. и др. Заявл. 2010. Оpubл. 27.07.2011. // Изобретения. Полезные модели. № 21.
4. Пат. № 106953 РФ, МПК G 01 N 1/18. Установка для определения прочности твердого топлива / Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Куценко А.И. и др. Заявл. 2010. Оpubл. 27.07.2011. // Изобретения. Полезные модели. № 21.

© 2012 г. И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов,
И.Н. Филлинберг, Я.К. Подолоков,
А.В. Прохоренко

Поступила 15 февраля 2012 г.

УДК 621.791:624

**Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев, С.Н. Старовацкая,
Р.Е. Крюков, З.В. Голдун**

Сибирский государственный индустриальный университет

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ НА СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ*

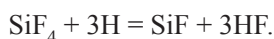
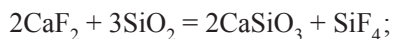
К изготовлению резервуаров для нефтепродуктов, предназначенных для работы в северных условиях, предъявляются повышенные требования в части газонасыщенности и загрязненности стали неметаллическими включениями. В конечном итоге эти показатели и определяют механические и эксплуатационные свойства металлоконструкций. Обычно при изготовлении резервуаров для нефтепродуктов в северном исполнении применяют низколегированную кремнемарганцовистую сталь 09Г2С (ГОСТ 19282 – 73), сварочную проволоку марки Св-08ГА (ГОСТ 2246 – 70), автоматическую дуговую сварку проводят под флюсом [1].

Для получения высоких значений механических свойств [2, 3] (в частности, ударной вязкости $KCU \geq 100$ Дж/см² в исходном состоянии и $KCU \geq 35$ Дж/см² при температуре –40 °С) желательно использовать флюсы с невысоким коэффициентом химической активности. При использовании этих флюсов наблюдается пониженное содержание кислорода, что обеспечивает небольшое количество неметаллических включений в шве. Большинство неметаллических включений, обнаруживаемых в сварных швах, являются оксидными соединениями экзогенного и эндогенного характера, образующимися в металле шва из остат-

ков шлака, а также при раскислении металла кремнием и марганцем из не успевших всплыть неметаллических включений. В настоящее время существуют три системы легирования за счет кремнемарганцевосстановительных процессов [4]: 1 – применение низкоуглеродистой электродной проволоки и высокомарганцовистого флюса с высоким содержанием кремнезема; 2 – применение низкоуглеродистой проволоки и высококремнистого (кислого) флюса; 3 – применение среднемарганцовистой электродной проволоки и среднемарганцовистого кислого флюса. Использование кремния и марганца в качестве раскислителей приводит к образованию различных оксидных включений, которые в связи со скоротечностью процесса сварки не всегда успевают всплыть и ассимилироваться шлаком, поэтому концентрация свободного и связанного кислорода в металле шва довольно высока, особенно при отрицательных температурах. Оптимальным, с точки зрения исключения образования в сварном шве неметаллических включений, является использование в качестве раскислителя углерода, так как образующиеся с участием углерода газообразные соединения (оксид и диоксид углерода СО и СО₂) легко удалимы, и они не загрязняют металл шва неметаллическими включениями. Однако использование углерода как раскислителя приводит к науглероживанию металла, что, в свою очередь, ухудшает механические свойства и структуру сварных швов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации госзаказа 7.5021.2011.

Вторым немаловажным вопросом является снижение концентрации водорода в сварном шве. Широкое распространение получили сварочные флюсы, содержащие фтористый кальций, криолит и другие соединения, позволяющие в результате диссоциации получать активный фтор, который образует соединение HF и удаляет водород из сварного шва по следующей схеме [2, 3]:



Третий вопрос – повышение устойчивости дуги, определяющей качество сварного шва. Известно, что устойчивость дуги обеспечивается за счет введения элементов (калия и натрия), облегчающих ионизацию в столбе дуги.

Изучение возможности проведения сварки с использованием углеродфторсодержащих добавок осуществляли с применением добавки, содержащей 21–46 % Al_2O_3 ; 18–27 % F^+ ; 8–15 % Na_2O ; 0,4–6,0 % K_2O ; 0,7–2,3 % CaO ; 0,5–2,5 % SiO_2 ; 2,1–3,3 % Fe_2O_3 ; 12,5–30,2 % $\text{C}_{\text{общ}}$; 0,07–0,90 % MnO ; 0,06–0,90 % MgO ; 0,09–0,19 % S ; 0,10–0,18 % P (по массе). Теоретически данная добавка должна позволять: проводить удаление водорода за счет фторсодержащих соединений (типа Na_3AlF_6 , CF_x ($1 \geq x > 0$) и т.д.), разлагающихся при температурах сварочных процессов с выделением фтора, который, в свою очередь, взаимодействует с растворенным в стали водородом с образованием газообразного соединения HF; осуществлять интенсивный углеродный «кип» за счет образования оксида и диоксида углерода при взаимодействии фтористого углерода CF_x ($1 \geq x > 0$) с растворенным в стали кислородом, при этом в связи с тем, что углерод находится в связанном состоянии, науглероживания стали практически не происходит; повысить устойчивость дуги за счет элементов (калия и натрия), облегчающих ионизацию в столбе дуги.

В настоящей работе исследовали влияние добавки на состав шва, структуру металла, содержание неметаллических включений в шве, сварочно-технологические свойства, механические свойства (в частности, ударную вязкость) сварных швов.

В опытах использовали окислительный флюс марки АН-348А с высоким содержанием оксидов кремния и марганца. Состав сварочного флюса марки АН-348А приведен ниже [2]: 41–44 % SiO_2 ; 34–38 % MnO ; 5,0–7,5 % MgO ; 4,0–5,5 % CaF_2 ; <6,5 % CaO ; <4,5 % Al_2O_3 ; <2 % Fe_2O_3 ; <0,15 % S ; <0,12 % P (по массе). Этот флюс при хороших сварочно-технологических свойствах (формирующие свойства и отделимость шлаковой корки) имеет существенный недостаток – повышенное содержание кислорода и неметаллических включений в швах, а следовательно, пониженную ударную вязкость при отрицательных температурах.

Добавку к флюсу готовили следующим образом. В отходы добавляли 10–12 % жидкого стекла плотностью 1,30–1,55 г/см³ при 15–25 °С; силикатный модуль $[\text{SiO}_2/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \cdot 1,0323] = 2,6 \div 3,0$. Все тщательно перемешивали и затем помещали в печь для просушки. После полного удаления влаги и спекания добавку охлаждали и дробили. Затем добавку смешивали с флюсом в специальном смесителе в определенном, строго заданном соотношении.

Эксперименты проводили на образцах из стали 09Г2С толщиной 16 мм размером 200×500 мм. Сварку стыковых швов без разделки кромок проводили с двух сторон как при сварке полотнищ стенок резервуаров на стенде для рулонирования. В качестве присадочного металла использовали проволоку марки Св-08ГА диам. 5 мм. Для исследования использовали следующие флюсы: АН-348А (базовый вариант), АН-348А и углеродфторсодержащую добавку в количестве 1, 3, 5, 7 и 10 %. Сварку образцов под флюсами проводили при одинаковых режимах. После сварки отбивали шлаковую корку, изучали поверхность металла шва и шлаковую корку со стороны, прилегающей к шву. Все флюсы имели хорошую отделимость шлака. Поверхность металла шва гладкая, без дефектов. Шлаковые корки пористые, это говорит о газовыделении из металла при кристаллизации, причем с увеличением добавки во флюсе количество пор в шлаке повышается.

Из сваренных пластин вырезали образцы и выполняли следующие исследования: рентгеноспектральный анализ состава металла швов, металлографические исследования сварных швов; определяли механические свойства сварных соединений (ударную вязкость швов определяли при температуре 20 и –40 °С).

Рентгеноспектральный анализ состава металла швов, выполненных под флюсами с разным количеством добавок, не выявил значительных отличий. Содержащийся в добавке углерод не привел к науглероживанию металла шва.

Проведено металлографическое исследование полированных микрошлифов сварных соединений с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле.

В микроструктуре всех исследованных сварных соединений наблюдали три основные зоны: основной металл, состоящий из зерен феррита и пластинчатого перлита (размер зерна 4–5 мкм) (рис. 1, а); образовавшаяся в результате рекристаллизации при нагреве в процессе сварки переходная зона от основного металла к наплавленному с мелкозернистой структурой (размер зерна 1–2 мкм) (рис. 1, б); наплавленный металл, в структуре которого присутствуют ферритные зерна, вытянутые в направлении отвода тепла (рис. 1, в).

При сварке проволокой марки Св-08ГА под флюсом АН-348А в поверхностной части сварного шва наблюдалось значительное количество неметаллических включений неправильной формы (рис. 2, а). В струк-

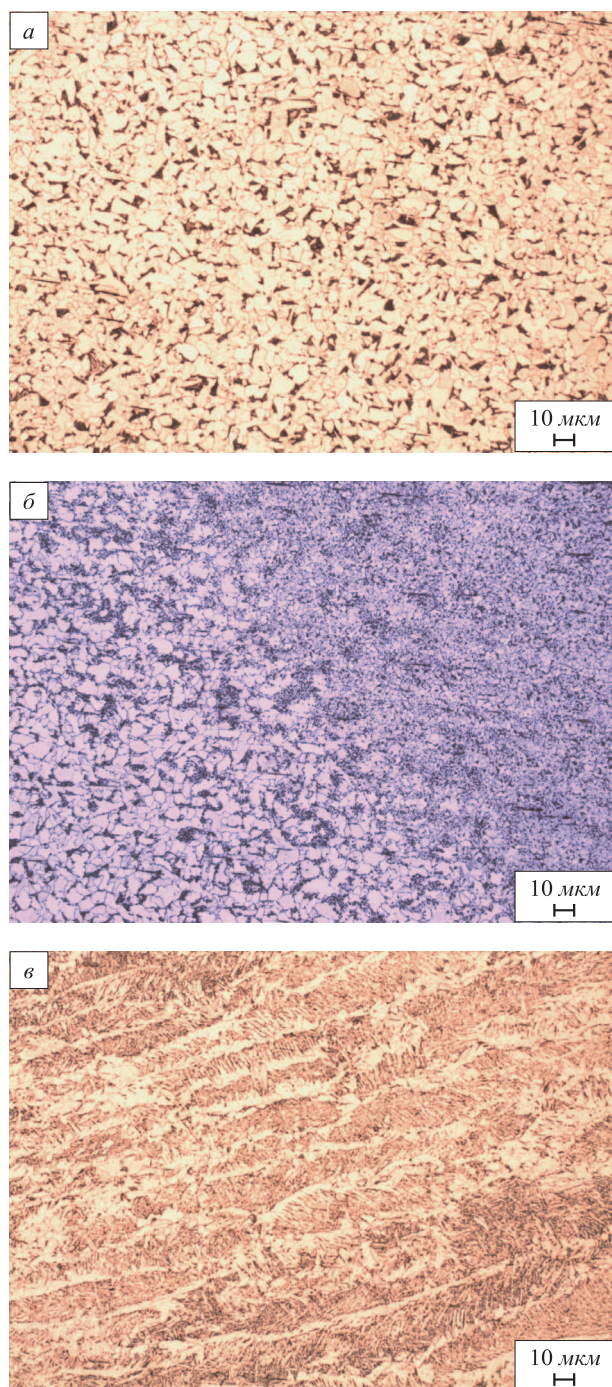
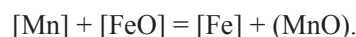
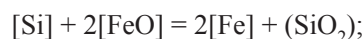


Рис. 1. Микроструктура сварных соединений:
а – феррито-перлитная структура основного металла; б – мелкозернистая переходная зона (зона термического влияния); в – вытянутые в направлении отвода тепла ферритные зерна в сварном шве

практически отсутствовали. Наблюдались лишь мелко-дисперсные сульфиды и окисульфиды, видимые при 500 кратном увеличении (рис. 3).

Большое количество неметаллических включений в швах, сваренных под флюсом марки АН-348А, связано со значительным развитием окислительно-восстановительных процессов, окислением металла компонентами флюса в зоне дуги и последующим раскислением металла кремнием и марганцем в задней части ванны по следующим реакциям:



Образующиеся оксиды и частицы шлака не успевают всплыть вследствие большой скорости кристаллизации.

За счет введенных добавок происходит, по-видимому, углеродный окислительный «кип», позволяющий удалять неметаллические включения и получать металл шва более «чистым» по включениям (рис. 3). Подтверждением сказанного является пористая шлаковая корка

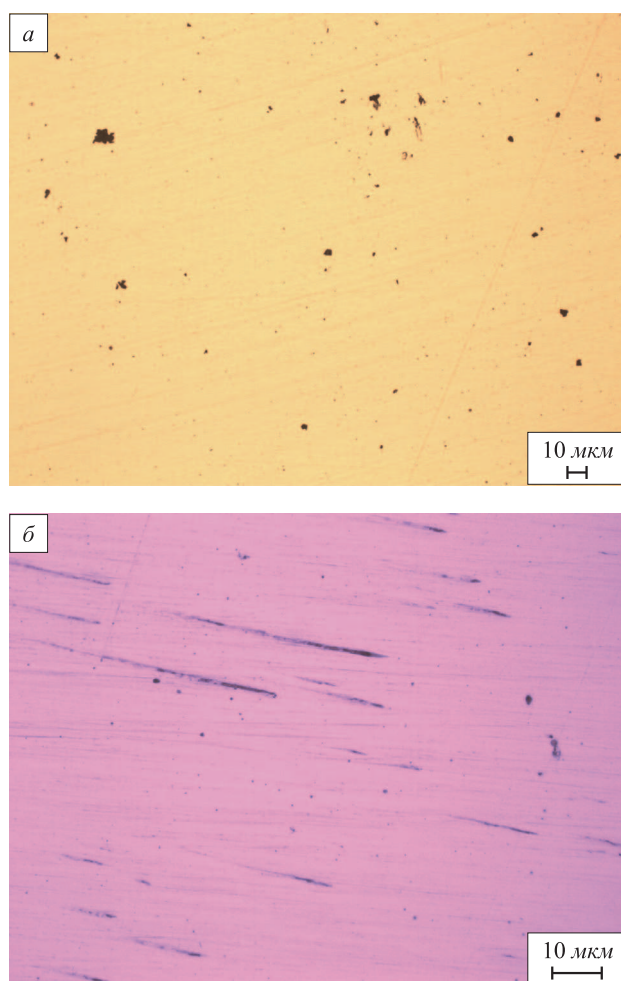


Рис. 2. Частицы шлаков в поверхностной зоне сварного шва (а) и сульфидные и окисульфидные включения в сварном шве (б) при использовании флюса марки АН-348А

туре металла шва наблюдались многочисленные сульфидные включения FeS и MnS , а также гетерогенные окисульфиды, состоящие из кристаллов Al_2O_3 , окруженных оболочками сульфидов (рис. 2, б).

В образцах, сваренных под флюсом с добавками, наблюдалось уменьшение количества неметаллических включений по мере увеличения количества добавки. В поверхностной зоне швов образцов, сваренных под флюсом с содержанием 3 и 10 % добавки, включения

Характеристики металла шва

Сварной шов при сварке	σ_b , МПа	σ_T , МПа	ψ , %	KCU, Дж/см ²	T, °C
под флюсом АН-348А	$\frac{535}{530 - 540}$	$\frac{360}{355 - 365}$	$\frac{25}{23 - 27}$	$\frac{70}{67 - 73}$	-40
				$\frac{102}{94 - 110}$	20
				$\frac{124}{118 - 130}$	-40
под флюсом АН-348А и 3 – 10 % добавки	$\frac{570}{564 - 576}$	$\frac{382}{375 - 389}$	$\frac{26}{24 - 28}$	$\frac{146}{139 - 153}$	20

Пр и м е ч а н и е. В числителе приведены средние значения показателей, полученные по результатам шести испытаний, в знаменателе минимальные и максимальные значения.

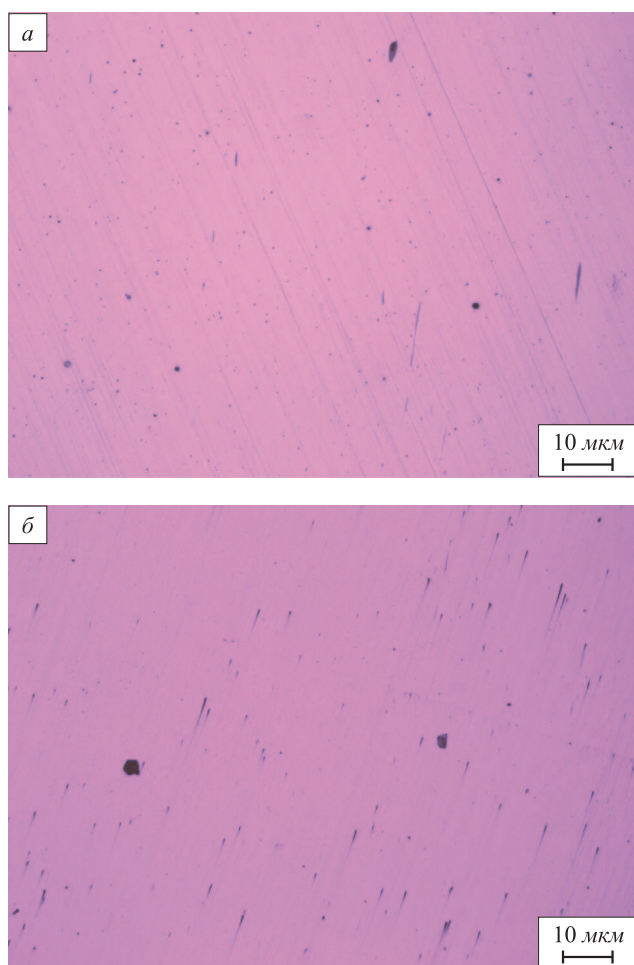


Рис. 3. Частицы шлаков в поверхностной зоне сварного шва (а) и гетерогенные окисульфидные включения Al_2O_3 с оболочкой сульфидов MnS и FeS (б) при использовании флюса марки АН-348А и добавки в количестве 3 – 10 %

при сварке под флюсом марки АН-348А с добавками, свидетельствующая о газовыделении из сварочной ванны при кристаллизации.

При применении рассмотренной схемы сварки стыковых швов образцов получаемый шов состоит в основном из металла, полученного переплавлением основного металла 09Г2С и электродного металла Св-08ГА. Механические свойства сварных соединений и швов определяли при температуре 20 °С, ударную вязкость

металла шва KCU определяли при температуре –40 °С. Характеристики металла шва приведены в таблице. Для проведения механических испытаний и определения ударной вязкости изготавливали стандартные образцы (ГОСТ 6996 – 66). Образцы для определения ударной вязкости вырезали поперек направления шва. Ударную вязкость определяли по результатам испытаний металла шва (ось надреза совпадала с осью шва).

Механические свойства и особенно ударная вязкость металла швов, выполненных под флюсами с добавкой в количестве 3 – 10 %, наилучшие, значительно превышают требуемые нормативные значения показателей для конструкций в северном исполнении. Существенное повышение ударной вязкости при отрицательных температурах можно объяснить уменьшением количества неметаллических включений в шве.

Выводы. На основании экспериментальных исследований показано, что углеродфторсодержащая добавка в количестве 3 – 10 % в окислительный флюс марки АН-348А способствует уменьшению количества неметаллических включений в шве. Установлено, что при сварке под окислительным флюсом АН-348А можно получать сварные швы с пониженным содержанием неметаллических включений и повышенными значениями механических свойств и особенно ударной вязкости. Результаты исследований будут использованы для разработки технологий сварки конструкций и резервуаров в северном исполнении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка, 1982. – 416 с.
2. Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие в 2 т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Б.П. Конисhev, С.А. Курланов, Н.Н. Потапов и др. / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
3. Подгаецкий В.В., Люборец И.И. Сварочные флюсы. – Киев: Техника, 1984. – 166 с.
4. Технология и оборудование сварки плавлением / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 360 с.

© 2012 г. Н.А. Козырев, В.Ф. Игушев,
С.Н. Старовацкая, Р.Е. Крюков, З.В. Голдун
Поступила 22 марта 2012 г.