

- low-energy, high-current electron beams. Chapter 6 in Book «Materials surface processing by directed energy techniques» Ed. by Y. Pauleau, Elsevier, 2006. P. 205 – 240.
4. Г л е з е р А.М., Г р о м о в В.Е., И в а н о в Ю.Ф., Ш а р к е е в Ю.П. Наноматериалы: структура, свойства, применение. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2012. – 423 с.
 5. Ч е р н я в с к и й К.С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
 6. Сплавы молибдена / Н.Н. Могутнова, Б.А. Клыпин, В.А. Бояршинов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 392 с.
 7. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996 – 2000. Т. 1 – 3.

© 2013 г. О.В. Олесюк, Д.А. Романов,
Е.А. Будовских, С.В. Коновалов,
В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А.Д. Тересов
Поступила 18 ноября 2013 г.

УДК 621.791:624

Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков, А.В. Роор

Сибирский государственный индустриальный университет

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДФТОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ ФЛЮС-ДОБАВКИ НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНОГО ШВА ОКСИДНЫМИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ*

При использовании флюсов некоторых марок не всегда обеспечиваются требуемые механические свойства металла сварного шва (в частности, ударная вязкость при пониженных температурах) в связи с образованием большого количества неметаллических включений. Большинство таких включений являются оксидными (независимо от того, экзогенные они или эндогенные). Содержание неметаллических включений в металле шва, в свою очередь, зависит от количества общего кислорода. Так как растворимость кислорода в твердом металле мала, то содержание общего кислорода характеризует уровень загрязненности неметаллическими включениями. При использовании существующих флюсов для сварки низколегированных сталей наблюдается повышенное содержание общего кислорода и, следовательно, повышенное количество неметаллических включений. В настоящее время снижение содержания неметаллических включений в металле сварных швов при автоматической сварке под флюсом достигается применением слабоокислительных флюсов, однако такие флюсы имеют неудовлетворительные сварочно-технологические свойства и редко применяются при сварке низколегированных сталей. В случае

использования окислительных флюсов металл шва насыщается кислородом в результате кремне- и марганцевосстановительных процессов.

В настоящее время при сварке применяются следующие системы легирования за счет кремнемарганцевосстановительных процессов: 1 – низкоуглеродистая электродная проволока и высокомарганцевистый флюс с высоким содержанием кремнезема; 2 – низкоуглеродистая проволока и высококремнистый (кислый) флюс; 3 – среднемарганцевистая электродная проволока и среднемарганцевистый кислый флюс. Эти системы имеют ряд недостатков:

– использование кремния и марганца в качестве раскислителей приводит к образованию различных оксидных включений, которые из-за скоротечности процесса сварки не всегда успевают всплыть и ассимилироваться шлаком, поэтому концентрация свободного и связанного кислорода в металле шва довольно высока. В связи с этим наблюдается понижение ударной вязкости металла шва, особенно при отрицательных температурах. Таким образом, оптимальным, с точки зрения исключения образования в металле сварного шва неметаллических включений, является использование углерода, так как образующиеся оксид и диоксид углерода находятся в газообразном состоянии, поэтому легко удаляются и не загряз-

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

няют металл шва неметаллическими включениями. Однако использование углерода в качестве раскислителя приводит к науглероживанию металла, что, в свою очередь, ухудшает механические свойства и структуру металла сварных швов;

- наблюдается недостаточная для удаления водорода концентрация во флюсах фторсодержащих компонентов, позволяющих в результате диссоциации получать активный фтор, который удаляет водород из металла сварного шва;

- отсутствие во флюсах большинства марок элементов (калия и натрия), облегчающих ионизацию и обеспечивающих устойчивое горение дуги.

В работах [1 – 6] использованы углеродфторсодержащие добавки в качестве присадок во флюсы. За основу добавки взяты отходы металлургического производства в виде пыли следующего химического состава: 25 – 30 % Al_2O_3 ; 30 – 50 % Na_3AlF_6 ; 25 – 35 % CF_x ($1 \geq x > 0$) (по массе).

Теоретически такие добавки позволяют:

- 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 оксида и диоксида углерода, образующихся 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 должно происходить;

- повышать устойчивость дуги за счет элементов (калия и натрия), облегчающих ионизацию в столбе дуги.

Добавку к флюсу готовили следующим образом: смешивали углеродфторсодержащий компонент с жидким стеклом, сушили, охлаждали и дробили; затем добавку перемешивали с флюсом в специальном смесителе в определенном, строго заданном соотношении. Для исследования были взяты плавленные флюсы марок АН-348А, АН-60, АН-67 для сварки стали 09Г2С и алюминатно-основной флюс Flux ОК 10.71 для сварки стали 10ХСНД. Рассматривали базовые варианты этих флюсов и их смеси с добавлением керамического флюса-добавки в различном процентном соотношении.

Эксперименты проводили на образцах толщиной 16 мм размером 200×500 мм. Сварку стыковых швов без разделки кромок проводи-

ли с двух сторон, как при сварке полотнищ стенок резервуаров на стенде для рулонирования. В качестве присадочного металла использовали проволоку марки Св-08ГА diam. 5 мм.

Сварку образцов под флюсами проводили при одинаковых режимах: сварочный ток $I_{\text{св}} = 650$ А, напряжение на дуге $U_{\text{д}} = 34$ В, скорость сварки $V_{\text{св}} = 25$ м/ч с одной стороны и $I_{\text{св}} = 680$ А, $U_{\text{д}} = 34$ В, $V_{\text{св}} = 25$ м/ч – с другой. Из сваренных пластин вырезали образцы и выполняли рентгеноспектральный анализ состава металла швов, металлографические исследования металла сварных швов, определяли содержание общего кислорода в металле швов, значения механических свойств, твердость сварных соединений и ударную вязкость металла швов при температурах 20, –40 и –70 °С согласно требованиям Государственных стандартов и нормативных документов для резервуарных и мостовых металлоконструкций.

Определение химического состава металла сварных швов на содержание углерода, серы и фосфора проводили химическими методами по ГОСТ 12344 – 2003, ГОСТ 12345 – 2001, ГОСТ 12347 – 77 соответственно. Содержание легирующих элементов в металле шва, оксидов кальция, кремния, магния, алюминия, марганца, железа, калия, натрия и фтористых соединений во флюсах с добавками и в полученных после сварки шлаках определяли на рентгенофлюоресцентном спектрометре XRF-1800 фирмы SHIMADZU.

Опыты показали, что при использовании углеродфторсодержащей добавки в количестве до 6 % обеспечивается концентрация углерода в металле шва не более 0,12 %, что соответствует концентрации углерода в исходном металле (рис. 1).

Содержание серы и фосфора в металле шва, полученном при сварке под флюсом с добавками и без добавок, не изменялось и находилось в пределах 0,015 – 0,019 и 0,013 – 0,015 % соответственно, т.е. применение флюсов с добавками не повлияло на переход серы и фосфора из сформировавшегося шлака в металл.

Определение содержания кислорода методом восстановительного плавления на газоанализаторе фирмы «LECO» TC-600 показало, что массовая доля кислорода с повышением содержания добавки во флюсе уменьшалась (рис. 2), а проведенный фракционный газовый анализ показал, что в зависимости от окисленности и основности шлаковой системы происходит перераспределение кислорода во включениях. Распределение кислорода в силикатах, алюминатах, алюмосиликатах, по-видимому, связано с основностью полученного шлака и ассими-

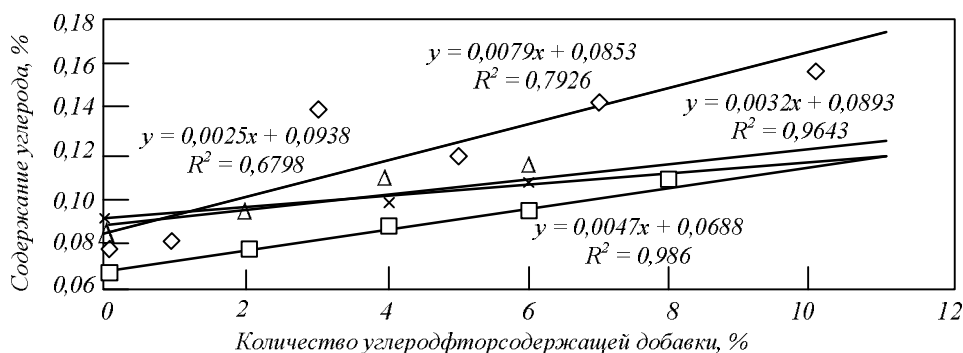


Рис. 1. Влияние количества углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-348 (◇), АН-60 (□), АН-67 (Δ) и Flux OK 10.71 (×) на содержание углерода в металле сварного шва

ляцией неметаллических включений шлаком в зависимости от получаемой вязкости шлака. Наибольшее количество алюминатов и алюмосиликатов, неблагоприятно влияющих на физико-химические свойства металла сварного соединения, содержалось при сварке под флюсом АН-60 и Flux OK 10.71; при введении добавки наблюдалось снижение количества алюминатов и алюмосиликатов. При использовании флюсов АН-348 и АН-67 изменения были незначительны (рис. 3).

Металлографические исследования полированных микрошлифов металла сварных соединений проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле при увеличениях 100 и 500. Микроструктуру металла выявляли травлением в 4 %-ом растворе HNO_3 в этиловом спирте. Структуру основного металла всех проб составляют зерна феррита и пластинчатого перлита (4 – 5 мкм). В переходной зоне от основного металла к наплавленному наблюдается мелкозернистая структура (1 – 2 мкм), образовавшаяся в результате рекристаллизации при нагреве в процессе сварки. В микроструктуре сварного шва присутствуют ферритные зерна, вытянутые в направлении отвода тепла вследствие нагрева

и ускоренного охлаждения. Заметного отличия структуры металла швов, выполненных под разными флюсами, не обнаружено. В образцах, сваренных под флюсами с углеродфторсодержащими добавками, наблюдалось снижение уровня загрязненности неметаллическими включениями, что связано с уменьшением общего содержания кислорода.

Изучение ударной вязкости при отрицательных температурах на образцах стали 09Г2С, вырезанных по ГОСТ 6996 – 66, показало, что экспериментальные значения значительно превышают требуемые по ГОСТ 31385 – 2008 и нормативные по РБ 03-69 «Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» (ударная вязкость не менее 35 Дж/см²) и возрастает с увеличением количества углеродфторсодержащей добавки (рис. 4); такая же тенденция сохраняется и для стали 10ХСНД (ГОСТ 6713 – 91).

Выводы. При введении разработанной углеродфторсодержащей добавки во флюсы АН-348А, АН-60, АН-67 и Flux OK 10.71 снижается газонасыщенность металла сварного шва, уменьшается загрязненность оксидными неметаллическими включениями, увеличивается

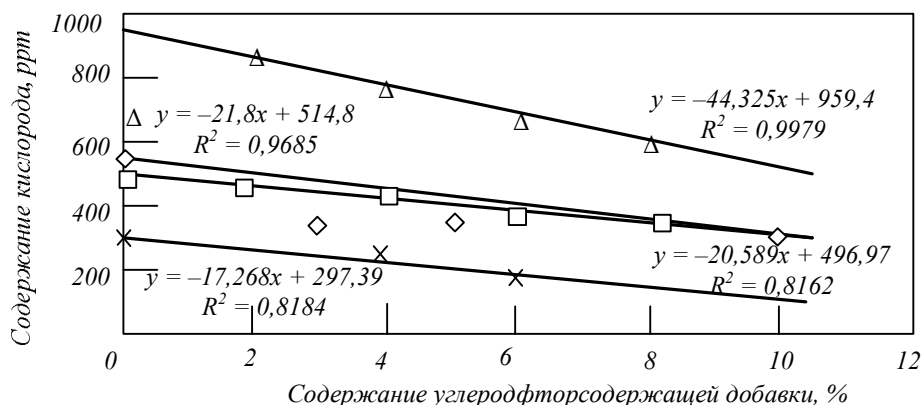


Рис. 2. Изменение количества общего кислорода во флюсах АН-348 (◇), АН-60 (Δ), АН-67 (□) и Flux OK 10.71 (×) в зависимости от количества углеродфторсодержащей добавки

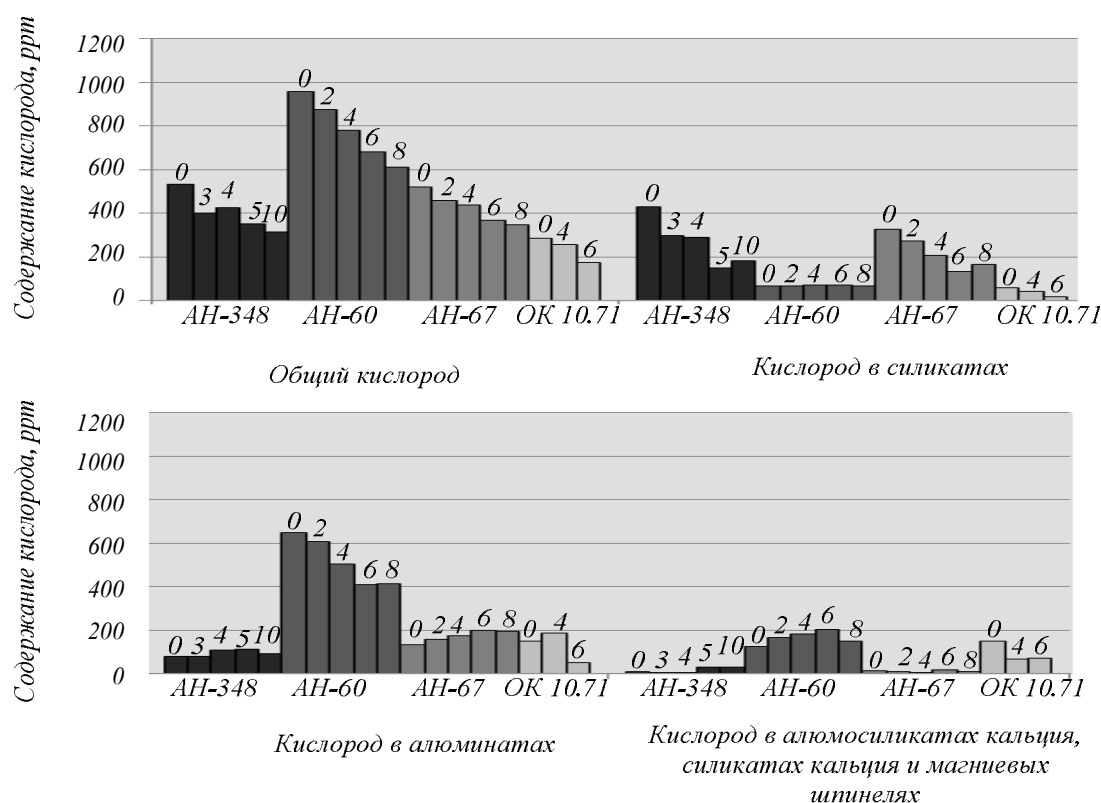


Рис. 3. Изменение концентрации общего и фракционного кислорода в зависимости от количества углеродфторсодержащей добавки (цифрами указано процентное содержание углеродфторсодержащей добавки)

ударная вязкость (особенно при отрицательных температурах). Производство углеродфторсодержащей добавки, защищенной патентом [7], освоено в условиях ОАО «Новокузнецкий завод резервуарных металлоконструкций».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Старовацкая С.Н. и др. Влияние углеродфторсодержащих добавок для сварочных флюсов на свойства сварных швов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 6. С. 26 – 29.
2. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Голдун З.В. и др. Использование углеродсодержащих добавок для сварочных флюсов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 35 – 38.
3. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е. и др. Влияние углерод- и фторсодержащих добавок в составе флюсов на содержание неметаллических включений и свойства сварных швов // Сварочное производство. 2012. № 12. С. 3 – 6.
4. Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е. и др. Влияние флюса АН-60 с уг-

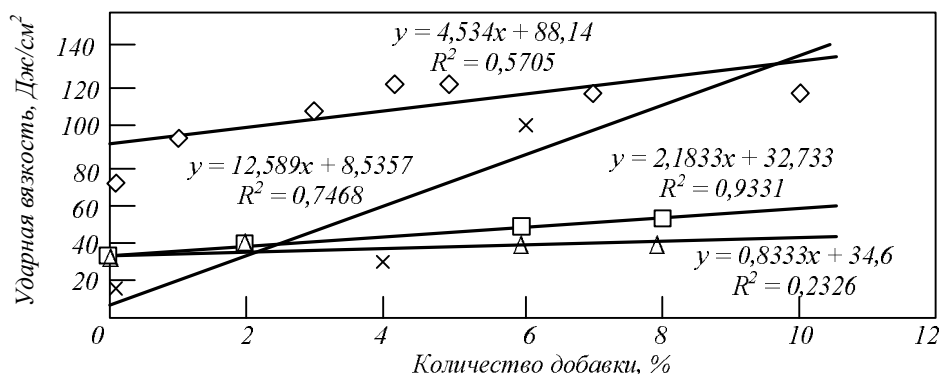


Рис. 4. Влияние количества углеродфторсодержащей добавки АН-348 (КУ при $t = -40^\circ\text{C}$) ($\diamond$), АН-60 (КСВ при $t = -20^\circ\text{C}$) ($\square$), АН-67 (КСВ при $t = -20^\circ\text{C}$) (Δ) и Flux OK 10.71 (КУ при $t = -70^\circ\text{C}$) ($\times$) на ударную вязкость

леродфторсодержащей добавкой на качество сварных швов стали 09Г2С // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 30 – 33.

5. К о з ы р е в Н.А., И г у ш е в В.Ф., К р ю к о в Р.Е. и др. Разработка добавок для сварочных флюсов при сварке низколегированных сталей // Сварочное производство. 2013. № 5. С. 9 – 12.
6. К о з ы р е в Н.А., И г у ш е в В.Ф., К р ю к о в Р.Е., Р о о р А.В. Исследование влияния введения углеродфторсодержащей добавки во флюс АН-67 на свойства метал-

ла сварных швов стали 09Г2С // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 8. С. 33 – 36.

7. Пат. 2484936 РФ. Керамический флюс-добавка / Козырев Н.А., Игушев В.Ф., Крюков Р.Е., Голдун З.В.; ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». Заявл. 13.02.2012; опубл. 20.06.2013.

© 2013 г. Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков,
А.В. Роор

Поступила 10 декабря 2013 г.