

УДК 621.791.753.042.5

Костин В.А.*

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МАРГАНЦА И ТИТАНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ ШВОВ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Исследовано влияние марганца и титана на структуру и свойства сварных швов низколегированных сталей, выполненных проволоками Св-10Г1НМА и ЭП934 под плавными и агломерированными флюсами. Установлено, что содержание неметаллических включений в металле швов, полученных при сварке под кислыми флюсами, существенно выше (2...3 %), чем в случае использования флюсов основного типа (0,1...0,3 %). Предложено использовать комплексный показатель, учитывающий уровень легирования металла швов марганцем, кремнием, титаном и алюминием с учетом влияния содержания оксидов титана в металле шва.

Низколегированные стали являются одним из самых распространенных видов конструкционных материалов. Проблемы сварки сталей данного класса остаются актуальными начиная с середины 50-х годов прошлого столетия. Многочисленные исследования, которые были выполнены в этой области, позволили установить, что основной структурной составляющей, обеспечивающей оптимальное сочетание характеристик прочности и вязкости металла сварных швов, является игольчатый феррит (ИФ). Благодаря мелкозернистому строению и малоугловым границам эта структурная составляющая обладает высокой вязкостью и прочностью [1]. Установлено, что сварные швы, содержащие до 1,7 % марганца, содержат 55 – 60 % ИФ [2], а для обеспечения содержания ИФ свыше 60 % необходимо легировать металл шва никелем, молибденом или титаном [3]. С другой стороны полигональный феррит (ПФ) считается наиболее опасной структурой с точки зрения хрупкого разрушения [4].

В результате исследований, проведенных в середине 60-х годов, была разработана технология сварки низколегированных сталей, которая предусматривала использование в качестве присадочного материала сварочных проволок, легированных марганцем, молибденом, никелем, титаном.

Повышение требований к основному металлу сварных конструкций привело к появлению в начале 70-х годов низколегированных сталей с низким содержанием углерода. Снижение содержания углерода до уровня 0,15 – 0,08 % позволило существенно повысить вязкость и стойкость против хрупкого разрушения низколегированных сталей.

Дальнейшее снижение содержания углерода происходило путем использования вначале конверторного, а потом и электродугового метода производства стали. При этом удалось снизить содержание углерода в металле до ультранизкого уровня (меньше 0,05 %). Регламентированный уровень прочности в этом случае достигается за счет легирования металла марганцем, титаном, никелем. В таких сталях удачно сочетается высокий уровень прочности ($\sigma_b \approx 820$ МПа), пластичности ($\delta \geq 20$ %) и ударной вязкости ($KCV_{-60} \geq 60$ Дж/мм²), в результате чего такой металл имеет очень низкую склонность к хрупкому разрушению [5].

Аналогичные подходы используют для повышения стойкости металла шва против хрупкого разрушения. Для компенсации снижения содержания углерода в металл шва вводится не один, а целый ряд легирующих элементов. В настоящее время разработаны различные технологические методы их введения. Наиболее эффективно управление легированием металла сварного шва достигается путем использования сварочных флюсов в сочетании со сварочными прово-

*ИЭС им. Е.О. Патона, канд. техн. наук

локами, что позволяет управлять как составом твердого раствора, так и составом, размером и распределением неметаллических включений (НВ).

Цель данной работы заключалась в изучении влияния марганца и титана на структуру и свойства металла швов.

Полученные в результате этой работы данные будут использованы как в определении оптимальных диапазонов содержаний марганца и титана, так и в технологии их введения в сварные швы низколегированных сталей.

Для проведения исследований выбраны образцы металла швов, полученные при сварке под флюсами с различным содержанием MnO в сочетании с проволоками Св-08А и Св-08ГА. Сварку стыковых соединений выполняли на режимах и по методике стандарта ISO 14171 (получение наплавленного металла) [7].

Из наплавленного металла отбирали образцы для определения химического состава металла и проведения металлографических исследований. Химический состав определяли методом спектрального анализа на установке Baird, оборудованной компьютером IBM PC для автоматического определения элементного состава металла. В ходе металлографических исследований оценивали долю отдельных составляющих микроструктуры металла, содержание легирующих элементов в твердом растворе, элементный состав неметаллических включений. Микроструктуру исследовали методами оптической и электронной металлографии с использованием оптического микроскопа “Неофот-32” и растрового электронного микроскопа JSM-840 фирмы “JEOL”, оборудованного платой захвата изображений MicroCapture с последующей регистрацией изображения на компьютере. Количественное определение микроструктурных составляющих проводили в соответствии с методикой МИС [8]. Содержание легирующих элементов в твердом растворе и элементный состав неметаллических включений определяли микрорентгеноспектральным методом с помощью энергодисперсионного спектрометра LINK 860/500 фирмы “Link System”.

В ходе исследований изучали влияние легирования марганцем и титаном на структуру и свойства металла швов низколегированных сталей. Легирование металла швов осуществляли через флюс или через сварочную проволоку сплошного сечения. Сварку выполняли под флюсами двух технологических типов – плавных и агломерированных; в состав каждого из этих типов входили флюсы с различной основностью.

Химический состав сварочных флюсов, использованных в исследовании, приведен в работе [9]. Плавный флюс АН-348А был легирован марганцем и кремнием (основность VI = 0,6), флюс АН-72 был легирован кремнием и алюминием (основность VI = 2,0). Агломерированный флюс 348К изготовлен на основе флюса АН-348 по технологии агломерированного флюса. В состав опытного флюса №19 был введен алюминий (основность VI = 2,0), опытный флюс №19М дополнительно содержал 5 % ферромарганца.

Для исследований были использованы проволоки Св-10Г1НМА и ЭП934 с различным содержанием титана и марганца (табл. 1). Механические свойства металла сварных швов приведены в [9]. Методом микрорентгеноспектрального анализа определяли состав отдельных структурных составляющих и неметаллических включений.

Таблица 1 – Химический состав наплавленного металла, полученного с использованием разных сварочных проволок

№ образца	Химический состав наплавленного металла, мас. %								
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Al	Ti
10Г1НМА	0,07	0,48	1,50	0,012	0,021	0,66	0,59	0,0158	0,161
ЭП934	0,087	0,34	1,02	0,010	0,021	1,38	0,25	0,0440	0,075

В ходе металлографических исследований оценивали долю структурных составляющих (полигонального феррита, перлита, игольчатого феррита, бейнита, МАК-фазы), образующихся в металле сварных швов в зависимости от вида используемой сварочной проволоки.

Из литературных данных [10, 11] известно, что влияние легирования металла швов углеро-

дистых и низколегированных сталей наиболее заметно проявляется на содержании полигонального феррита. Результаты исследований, приведенные на рис. 1, показывают отсутствие подобных зависимостей для исследованных швов. Подобная картина может быть объяснена тем, что марганец оказывает неоднозначное влияние на металл сварных швов. В зависимости от условий взаимодействия марганец, переходящий в металл сварочной ванны из шлака, может конденсироваться в неметаллических включениях или легировать твердый раствор. Исходя из этих предположений, влияние марганца на структуру и свойства металла швов целесообразно оценивать при помощи показателя, учитывающего содержание марганца как в НВ, так и в твердом растворе. В качестве такого показателя может быть использовано, например, соотношение $(MnO)/Mn_{тр}$.

Как видно из данных, приведенных на рис. 2, с увеличением соотношения $(MnO)/Mn_{тр}$ от 0 до 50 происходит заметное снижение доли полигонального феррита в их микроструктуре, что благоприятно сказывается на ударных свойствах швов, особенно при низких температурах. Влияние легирования металла швов марганцем на их структуру и механические свойства хорошо известно. Однако, использование для описания этой зависимости соотношения $(MnO)/Mn_{тр}$ дает возможность более подробно изучать указанный процесс. Так, например, из данных, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что в области низких величин данного соотношения (0...15), т.е. преимущественного содержания марганца в твердом растворе, количество полигонального феррита заметно возрастает, вызывая снижение ударной вязкости металла сварных швов. При высокой величине соотношения (15...50) марганец, наоборот, находится преимущественно в виде неметаллических включений в металле швов, которые способствуют образованию игольчатого феррита, что благоприятно сказывается на ударных свойствах (рис. 3).

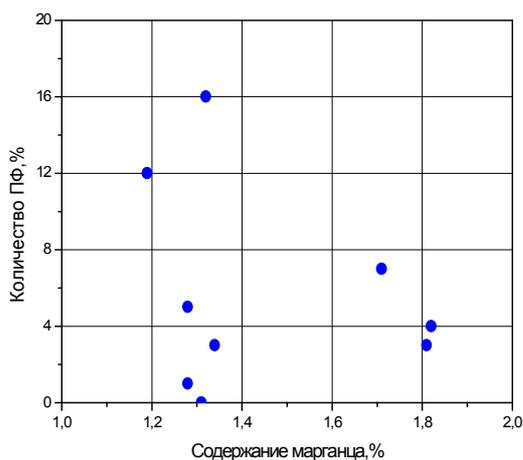


Рис. 1 – Зависимость между содержанием в металле шва марганца и количеством в них полигонального феррита (ПФ)

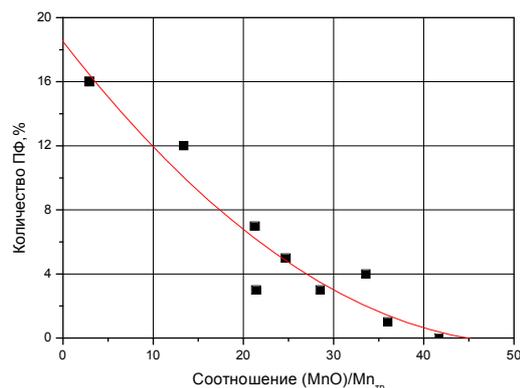


Рис. 2 – Взаимосвязь между соотношением $(MnO)/Mn_{тр}$ и содержанием полигонального феррита.

Результаты исследований, показали, что содержание неметаллических включений в металле швов, полученных при сварке под кислыми флюсами существенно выше (2...3 %), чем в случае использования флюсов основного вида (~ 0,2 %). При этом отмечено, что если в первом случае включения представляют собой преимущественно силикаты марганца, то во втором случае в их составе содержится значительное количество оксидов алюминия и титана. С повышением основности флюса возрастает содержание титана в металле швов при использовании как проволоки Св-10Г1НМА, так и ЭП934.

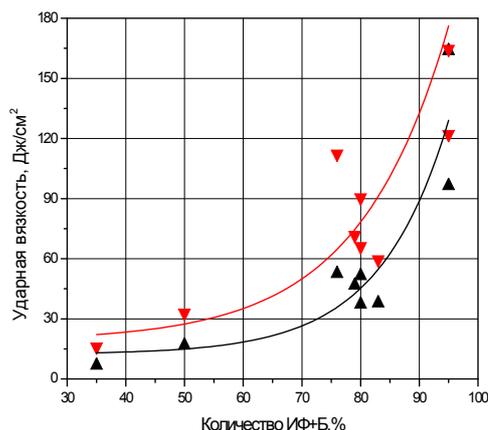


Рис. 3 – Влияние содержания ИФ+Б на ударную вязкость сварных швов при +20 °С (▼) и при -20 °С (▲).

Исходя из приведенных выше литературных данных, следует, что повышение содержания титана в сварочных проволоках (ЭП934 – 0,075 %, Св-10Г1НМА – 0,161 %) должно вызывать соответствующее повышение доли игольчатого феррита в структуре металла швов и содержания оксидов титана во включениях, расположенных в теле зерен первичного аустенита. Полученные в работе данные, графическое представление которых приведено на рис. 4, показали, что подобная зависимость имеет весьма размытые формы, характеризуется отдельными выпадками и может быть представлена скорее в виде определенной области, чем линейного графика.

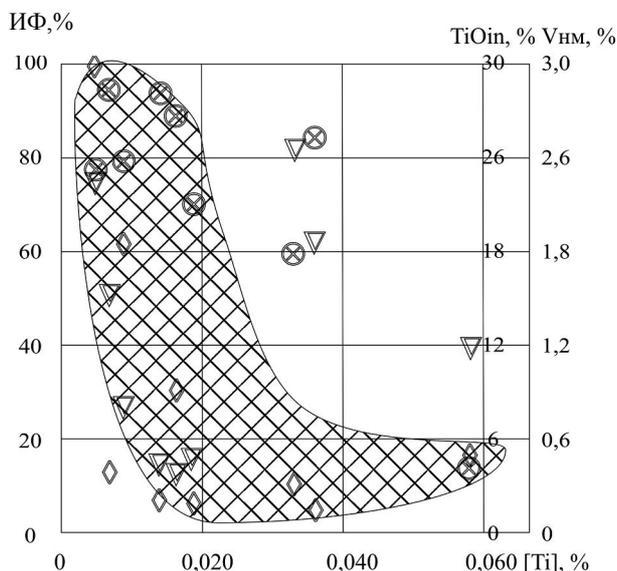


Рис. 4 – Влияние титана в металле швов на долю игольчатого феррита (ИФ ⊗), объемную долю включений ($V_{нм}$ ◇) и содержание оксидов титана во включениях (TiO_{in} ▽).

Анализ результатов химического состава металла исследованных швов, позволил установить, что с изменением основности сварочного флюса и содержания титана в электродной проволоке изменяется не только уровень легирования металла швов титаном, но также марганцем, кремнием и алюминием. Тем самым, для адекватной оценки влияния марганца и титана на микроструктуру и свойства сварных швов, нельзя не учитывать, возможное влияние и других (кремния и алюминия) активных раскислителей, которые входят в состав неметаллических включений и твердого раствора.

Математическая обработка данных, которые были получены в ходе исследования, позволила установить взаимосвязь между этими показателями:

$$KCV_{-20} = 4 \cdot \{TiO_{in} + [Mn + 50Ti]\} / [Si + 10Al] \quad (1)$$

Данная зависимость показывает, во-первых, существенное влияние на уровень ударной вязкости содержания титана в металле, положительное действие легирования марганцем свар-

ных швов и содержания оксидов титана в неметаллических включениях, расположенных в теле ферритных зерен и, во-вторых, указывает на необходимость учета негативного влияния в данной ситуации легирования швов кремнием и особенно алюминием.

Использование такого комплексного показателя дает возможность повысить обоснованность при разработке, а также выборе сочетания сварочных материалов, предназначенных для сварки низколегированных сталей повышенной и высокой прочности.

Выводы

1. Установлено, что содержание неметаллических включений в металле швов, полученных при сварке под кислыми флюсами, существенно выше, чем в случае использования флюсов основного типа. При этом отмечено, что если в первом случае включения представляют собой преимущественно силикаты марганца, то в другом случае в их составе содержится значительное количество оксидов алюминия и титана.
2. Для оценки влияния условий легирования металла швов низколегированных сталей на структуру и ударную вязкость при низких температурах предложено использовать комплексный показатель, учитывающий уровень легирования швов марганцем, кремнием, титаном и алюминием, а также учитывать содержание оксидов титана в металле шва.
3. Комплексное увеличение содержания марганца и титана в сварных швах низколегированных сталей снижает количество полигонального феррита, способствуя образованию, через неметаллические включения, игольчатого феррита.

Перечень ссылок

1. *Abson D.I.* The role of nonmetallic inclusions in ferrite nucleation in carbon steel weld metals / *D.I. Abson, R.E. Dolby, P.M. Hart* // Trends in steel and consumables for welding: Weld. Inst. Conf. – London. – 1978. – London: Weld. Institute. – 1978. – 88 p.
2. *Barritte G.S.* The effect of inclusions on the structure and properties of HSLA steel weld metals. Strength metals and allos / *G.S. Barritte, R.A. Ricks, P.R. Howell* // Proc. 6th Internal. Conf. – Melbourne, 16 – 20 August. – 1982. – Vol. 1. – Oxford. – 1982. – P. 121 – 126.
3. *Bonnet C.* Structure-resilience dans les soudures d'aciers doux et faiblement allies brutes de solidification *C. Bonnet* // Soudage et techniques connexes. – 1980. – № 7 – 8. – P. 209 – 230.
4. *Curry D.C* Effects of microstructure on cleavage fracture stress in steel / *D.C. Curry, J.F. Knott* // Metal Sci. – 1978. – V. 12. – 511 p.
5. *Irving B.* Steel companies emphasize improving weldability of HSLA steels / *B. Irving* // Welding journal. – 1995. – N 4. – P. 39 – 44.
6. International Standard ISO 14171 Welding consumables – Wire electrodes and wire-flux combinations for submerged arc welding of non alloy and fine grain steels – Classification.
7. Guidelines for the classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope // Welding in the World. – 1986. – Vol. 24, No. 7/8. – P. 144 – 148.
8. *Грабин В.Ф.* Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / *В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко.* – К.: Наукова думка, 1978. – 272 с.
9. Усовершенствовать методики эксперимента, исследовать физико-химические процессы и изучить их влияние на структурно-фазовый состав и свойства при формировании слитков, сварных соединений и покрытий: отчёт о НИР: рук. Григоренко Г.М. – 2006. – № ГР 0103U005240.
10. *Лившиц Л.С.* Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / *Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов.* – М.: Машиностроение, 1989. – 334 с.
11. *Court S.A.* The effects of Mn and Si on the microstructure and properties of SMA steel weld metal / *S.A. Court, G. Pollard* // IW Doc. II-A-789-89. – 14 p.

Рецензент: В.Г. Васильев
канд. техн. наук, ИЭС им. Е.О. Патона

Статья поступила 09.04.2008