

УДК 621.791.753.5.048

РОЛЬ СВАРОЧНОГО ФЛЮСА В ФОРМИРОВАНИИ МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

В. В. ГОЛОВКО, С. Н. СТЕПАНЮК, Д. Ю. ЕРМОЛЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На основании анализа результатов научных исследований в области металлургии сварки высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей показано изменение взгляда на роль сварочного флюса в обеспечении показателей качества металла швов. Сделан вывод, что современные сварочные флюсы должны принимать самое эффективное участие в процессах рафинирования сварочной ванны, управления металлургическими процессами образования неметаллических включений определенного состава, морфологии и характера распределения в твердом растворе с целью обеспечения требуемого структурного состава металла шва и комплекса его механических свойств при сварке ВПНЛ сталей. Исходя из имеющегося производственного опыта, авторы сделали вывод, что значительное преимущество в получении швов с прогнозируемым комплексом неметаллических включений имеют агломерированные флюсы, которые характеризуются высокой технологической гибкостью за счет управления их окислительной способностью, возможностью влиять на образование в швах неметаллических включений определенного состава и морфологии. Сварные соединения, полученные с использованием флюсов этого типа, приобретают комплекс механических свойства на уровне значений основного металла. Библиогр. 13, рис. 7.

Ключевые слова: высокопрочная низколегированная сталь, сварка, сварочный флюс, неметаллические включения, микроструктура, механические свойства

Несмотря на многочисленные прогнозы бурного роста объемов применения полимерных материалов в строительстве, машиностроении, энергетике, на сегодняшний день стали остаются самым распространенным конструкционным материалом. Надо полагать, что такая ситуация сохранится и в ближайшие десятилетия. Сварка прочно занимает лидирующие позиции среди способов соединения стальных изделий, а дуговая сварка остается основной технологией в этой области. Анализ ситуации с потреблением сварочных материалов для дуговых методов сварки за последнее десятилетие показывает, что сварка под флюсом занимает 7...10 % в общем объеме дуговых способов и нет оснований предполагать существенные изменения такой позиции.

Появившись в 30-х гг. XX века, сварка под флюсом пережила этап интенсивного развития, в ходе которого были проведены глубокие фундаментальные исследования металлургических, электрических и физико-химических процессов, послуживших основой для широкого внедрения к середине 70-х гг. автоматизированной сварки в различных отраслях промышленности. Проведенные за эти годы исследования в сочетании с накоплением практического опыта применения флюсов и совершенствованием технологии производства качественных сталей вызвали измене-

ния в подходах к определению роли самого флюса в процессе формирования сварного шва. Если на начальном этапе развития флюсу отводили роль пассивной защиты сварочной ванны от окружающей среды, а работающего персонала — от воздействия дуги, то в последующие годы флюс стали рассматривать как активного участника металлургических процессов, протекающих в зоне горения дуги и в жидкой ванне.

Требования к эксплуатации сварных конструкций определяют необходимость гарантирования служебных свойств сварных соединений на уровне современных высокопрочных сталей, поэтому флюс в сочетании с электродной проволокой должен обеспечивать легирование, микролегирование, модифицирование и рафинирование металла шва. При этом должны быть обеспечены высокие сварочно-технологические свойства флюса с целью получения качественных швов в широком диапазоне режимов и технологий сварки.

Листовой прокат низколегированных сталей, используемых в настоящее время для изготовления сварных конструкций, отличается сочетанием высоких показателей прочности, пластичности и вязкости вследствие формирования мелкозернистой (до 1 мкм) ферритно-бейнитной или бейнитно-мартенситной микроструктуры. Сварные соединения таких сталей должны обладать комплексом механических свойств на уровне значе-

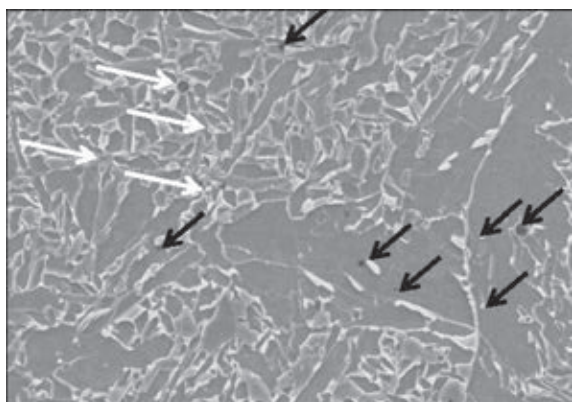


Рис. 1. Микроструктура ($\times 1000$) металла шва ВПНЛ стали (SEM JSM-35): светлые стрелки — ферритообразующие НВ в процессе рекристаллизации; темные — остальные НВ

ний основного металла. Сварочным флюсам в этом случае отводится ведущая роль в получении необходимой микроструктуры металла шва и механических свойств сварного соединения.

Исследованию условий формирования микроструктуры металла швов ВПНЛ сталей посвящено большое количество работ, в результате проведения которых было установлено, что одним из факторов, оказывающих определяющее влияние на структуру, являются неметаллические включения (НВ) [1–4]. Современные флюсы должны не только защищать сварочную ванну от окружающей атмосферы, но и задавать требуемый уровень кислородного потенциала шлаковой фазы [5], совместно с низколегированной проволокой способствовать образованию НВ прогнозируемого количества, состава и размеров [6]. В металле швов, полученных при сварке под флюсом современных ВПНЛ сталей, содержится 0,02...0,04 % кислорода и менее 0,01 % серы. Используя известное выражение $V_{НВ} = 5,5 [\%O + \%S]$, можно установить, что данному содержанию кислорода и серы соответствует 0,15...0,30 об.% НВ. Однако оказывать

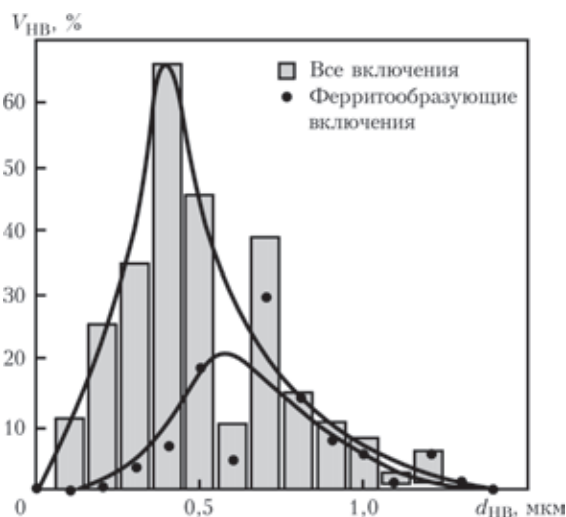


Рис. 2. Гистограмма распределения размеров всех включений и включений, являющихся центрами зарождения игольчатого феррита в металле швов ВПНЛ сталей [9]

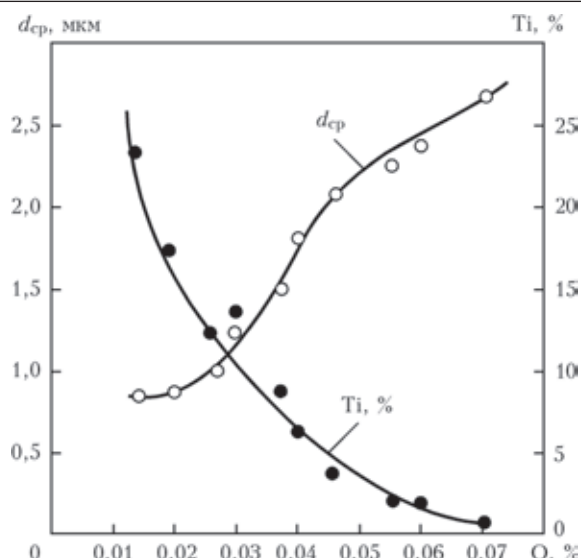


Рис. 3. Влияние содержания кислорода в металле шва на средний размер НВ и содержание в них титана

активное влияние на зарождение ферритной фазы могут только около 30 % из них [7, 8] (рис. 1, 2).

Наиболее эффективны в этом отношении включения размером от 0,3 до 1,0 мкм [9], имеющие специфическую морфологию. Зародышами образования НВ в металле шва служат тугоплавкие оксиды (например Al_2O_3), которые присутствуют в виде кристаллов в жидком металле сварочной ванны. Когда на поверхности тугоплавкого включения выделяется оксид титана, в прилегающих областях твердого раствора могут образовываться зоны с пониженным содержанием легирующих элементов, имеющих высокую подвижность в γ -фазе [9, 10]. Включения данного типа являются наиболее эффективными центрами зарождения бейнитной микроструктуры.

С целью рафинирования сплавов на основе железа в металлургии широко используются такие раскисляющие элементы, как алюминий, кремний, титан и марганец. Технология изготовления агломерированных флюсов позволяет в широких пределах регулировать величину их кислородного потенциала [11]. Управление содержанием кислорода в металле шва за счет изменения окислительной способности шлаковой фазы в сочетании с введением в состав флюсов активных раскислителей дает возможность использовать агломерированные флюсы не только для снижения объемной доли НВ в шве, но и для формирования включений определенного размера и состава (рис. 3, 4).

Использование флюсов такого типа при дуговой сварке значительно расширяет область применения методов прогнозируемого влияния на формирование НВ определенного состава и морфологии в металле швов [12]. Сварные соединения в этом случае приобретают комплекс механических свойства на уровне значений ВПНЛ сталей [13]. Со снижением содержания кисло-

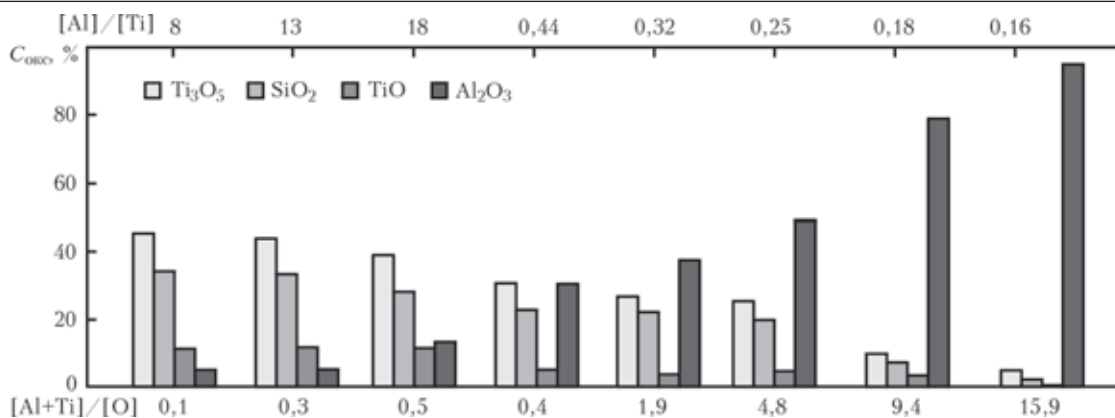


Рис. 4. Изменение состава НВ в металле шва в зависимости от соотношения окислитель/раскислитель в сварочной ванне

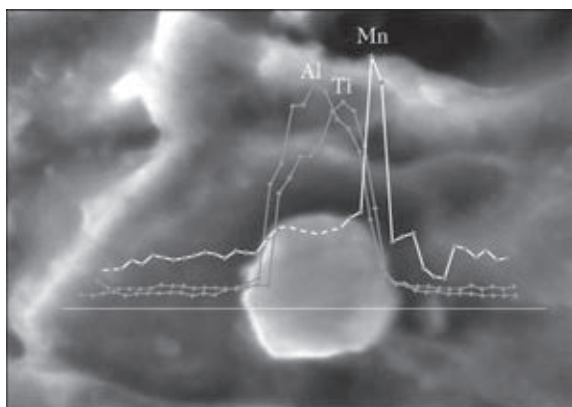


Рис. 5. Распределение элементов в НВ и близлежащих зонах твердого раствора

рода в швах, легированных титаном, не только уменьшается средний размер НВ, но и повышается выделение соединений титана на поверхности тугоплавких включений типа Al_2O_3 . Анализ химического состава НВ такой морфологии и окружающей их металлической матрицы, выполненный с использованием микрозонда для рентгеноспектрального анализа, показал, что те включения, на поверхности которых содержится тонкая пленка соединений титана, имеют повышенную концентрацию марганца во внешнем слое и пониженное

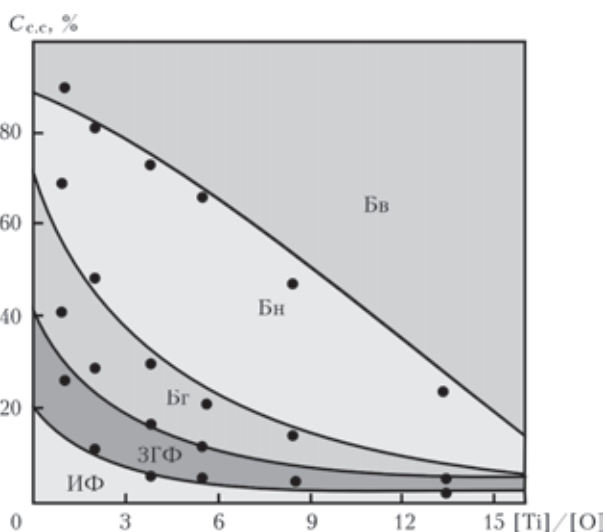


Рис. 6. Влияние соотношения титан/кислород в НВ на содержание структурных составляющих и стойкость к разрушению металла сварных швов

содержание марганца в близлежащих к включениям зонах твердого раствора (рис. 5). Включения такой морфологии способствуют образованию ферритной фазы повышенной вязкости в процессе $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения (рис. 6).

Комплекс механических свойств шва определяется сочетанием составляющих его структуры.

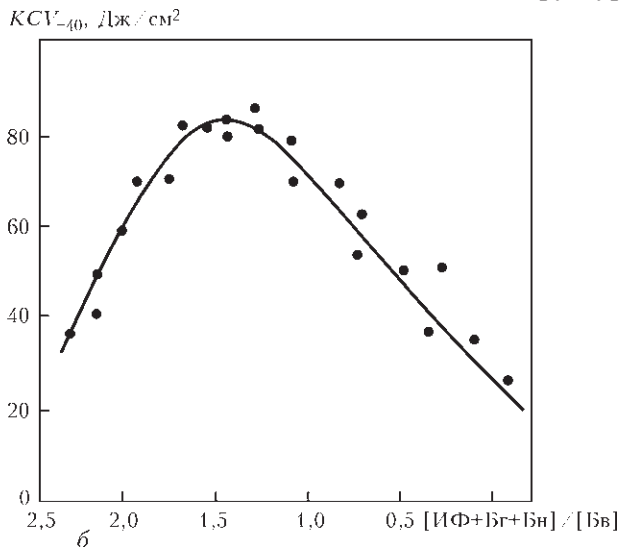
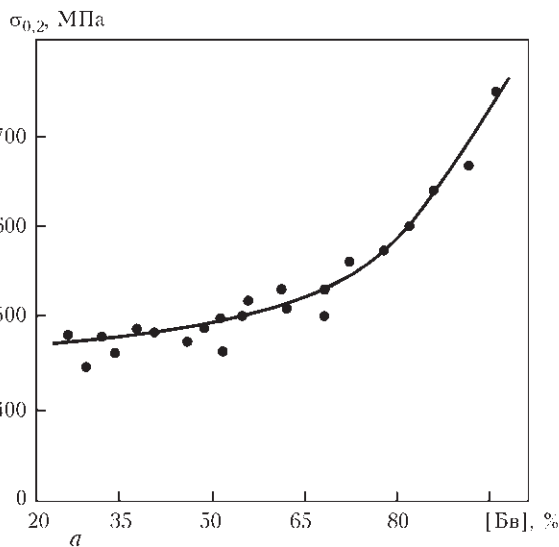


Рис. 7. Влияние соотношения структурных составляющих на предел текучести (а) и ударную вязкость (б) металла шва

Повышение доли микроструктурных фракций с повышенной твердостью приводит к росту показателей прочности металла (рис. 7, а), а высокое содержание микроструктур, образующихся в низкотемпературной зоне $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, характеризуется повышенной стойкостью к хрупкому разрушению при низких климатических температурах (рис. 7, б). Оптимальное сочетание показателей прочности, вязкости и пластичности для каждого отдельного случая определяется комплексом данных структурных составляющих.

Как видно из данных, приведенных на рис. 6 и 7, повышение до 60 % содержания в микроструктуре таких вязких составляющих, как игольчатый и зернограничный феррит, гранулированный и нижний бейнит, обеспечивает рост ударной вязкости металла швов, при этом предел текучести не превышает уровня 500...550 МПа, характерного для швов с ферритной структурой. Рост доли верхнего бейнита в микроструктуре шва способствует повышению показателей его прочности, но снижает ударную вязкость при низких температурах.

Заключение. Научные исследования и большой практический опыт в области сварки ВПНЛ сталей привели к очевидному изменению взгляда на роль сварочного флюса в обеспечении качества металла швов. Современные сварочные флюсы должны принимать самое эффективное участие в рафинировании сварочной ванны, управлении металлургическими процессами формирования НВ определенного состава, морфологии и характера распределения в твердом растворе с целью обеспечения требуемого структурного состава металла шва и комплекса его механических свойств при сварке ВПНЛ сталей. Производственный опыт показал, что значительное преимущество в этом отношении имеют агломерированные флюсы, которые характеризуются высокой технологической

гибкостью за счет управления их окислительной способностью. Сварные соединения, полученные с использованием флюсов этого типа, обладают комплексом механических свойства на уровне значений ВПНЛ сталей.

1. Zhang L., Thomas B. G. State-of-the-art in evaluation and control of steel cleanliness: Review // ISIJ Intern. – 2003. – 43, N.3. – P. 271–291.
2. Correlation study of microstructure, hardness and Charpy impact properties in heat affected zones of three API X80 line pipe steels containing complex oxides / S. Y. Shin, K. Oh, S. Lee, N. J. Kim // Metal Materials Intern. – 2011. – 17, N.1. – P. 29–40.
3. Inclusion population evolution in Ti-alloyed Al-killed steel during secondary steelmaking process / E. Zinngrebe, C. Van Hoek, H. Visser, A. Westendorp et al. // ISIJ Intern. – 2012. – 52, N 1. – P. 52–61.
4. Wegrzyn T. Proposal of welding methods in terms of the amount of oxygen // Ibid. – 2011. – 47, No.1. – P. 57–61.
5. Головки В. В. Влияние окислительного потенциала сварочных флюсов на легирование твердого раствора металла швов // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 10–14.
6. Головки В. В., Походня И. К. Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла швов высокопрочных низколегированных сталей // Там же. – 2013. – № 6. – С. 3–11.
7. Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds / T. K. Lee, H. J. Kim, B. Y. Kang, S. K. Hwang // ISIJ Intern. – 2000. – 40. – P. 1260–1268.
8. Microstructure control of steels through dispersoid metallurgy using novel grain refining alloys / O. Grong, L. Kolbeinsen, C. Eijk, G. Tranell // Ibid. – 2006. – 46, No. 6. – P. 824–831.
9. Sarma D. S., Karasev A. V., Jonsson P. G. On the role of non-metallic inclusions in the nucleation of acicular ferrite in steels // Ibid. – 2009. – 49, N. 7. – P. 1063–1074.
10. Seo J. S., Kim H. J., Lee C. Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds // Ibid. – 2013. – 53, N. 5. – P. 880–886.
11. Головки В. В., Подгаецкий В. В., Бондаренко Т. П. Окисленность шлаковых расплавов системы $MgO-Al_2O_3-SiO_2-CaF_2$ // Автомат. сварка. – 1993. – № 9. – С. 28–30.
12. Влияние легирования марганцем и титаном на особенности распада аустенита в металле низколегированных швов / В. В. Головки, В. А. Костин, В. В. Жуков, И. А. Прибытько // Вестн. Черниг. ГТУ. – 2010. – № 45. – С. 125–133.
13. Головки В. В. Агломерированные флюсы в отечественном сварочном производстве (Обзор) // Автомат. сварка. – 2012. – № 2. – С. 38–41.

Поступила в редакцию 23.04.2014