



ПОВЫШЕНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНОГО ШВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАФИНИРОВАННОГО КОМПЛЕКСНОГО ФЕРРОСПЛАВА В ПОКРЫТИИ ЭЛЕКТРОДОВ УОНИ-13/55

В. С. ПОПОВ, д-р техн. наук, **И. М. БИЛОНИК**, канд. техн. наук, **С. П. БЕРЕЖНЫЙ**, **М. В. СИДОРЕНКО**, инженеры (Запорож. нац. техн. ун-т),
А. А. СЕЛЕЗНЕВ, **В. В. ПОПОВ**, инженеры (ОАО «Южцветметгазоочистка», г. Запорожье)

Показано, что применение комплексного ферросплава взамен традиционных ферросплавов-раскислителей в покрытии электродов приводит к снижению содержания неметаллических включений в малоуглеродистом металле шва, повышению уровня его кратковременных механических свойств и предела выносливости.

Ключевые слова: электрофильтры, механизм встряхивания, балка встряхивания, боек, наковальня, трещины, ферросплавы

На тепловых электростанциях, металлургических комбинатах и цементных заводах для очистки воздушного потока, запыленного взвешенными частицами, применяют осадительные электрические фильтры. Эффективность и длительность их эксплуатации в значительной мере зависят от работы механизма встряхивания, осуществляющего сброс осаждающихся на электроде частиц. Рабочими органами механизма встряхивания являются боек и наковальня.

Для сварки наковальни с балкой встряхивания используют электроды основного типа УОНИ-13/55, обеспечивающие получение наплавленного металла с максимальными для нелегированных сталей прочностными и пластическими свойствами. Тем не менее, в сварных швах, соединяющих наковальню с балкой встряхивания, обнаруживали трещины, располагающиеся преимущественно по металлу сварного шва (рис. 1). Сами по себе такие трещины не вызывают разрушения металлокон-

струкций электрофильтра. Однако, поскольку балка встряхивания выполняет роль упругого волновода, их наличие приводит к увеличению диссипативных свойств материала и рассеиванию энергии ударного импульса.

Согласно работе [1] при усталостной трещине, охватывающей до 35 % сечения консольного двутавра, коэффициент поглощения энергии повышается в 5 раз. Следовательно, возникающие трещины повышают демпфирующие свойства металла сварных швов, в результате чего стряхивание уловленных на осадительном электроде частиц осуществляется недостаточно эффективно, что снижает степень очистки пылегазового потока. Происходит налипание пыли на электродах, увеличение массы приводит к прогибанию несущих конструкций и преждевременному выходу из строя всего фильтра.

Целью настоящей работы являются исследование причин появления трещин в местах сварки наковальни с балкой встряхивания и разработка мероприятий, исключающих их возникновение и повышающих выносливость металла сварного шва.

За время работы балки встряхивания (5–7 лет) она должна выдержать в зависимости от интенсивности встряхивания от $2 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^6$ циклов

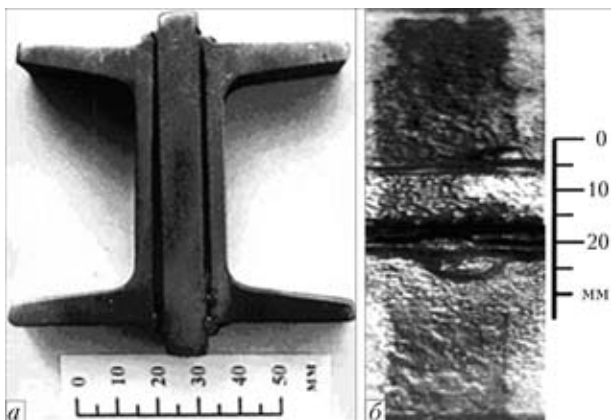


Рис. 1. Трещины в металле сварного шва, выполненного электродами УОНИ-13/55, в местах приварки наковален к балке встряхивания, обнаруженные в процессе ремонта: *a* — поперечное сечение балки; *b* — то же, вид сверху

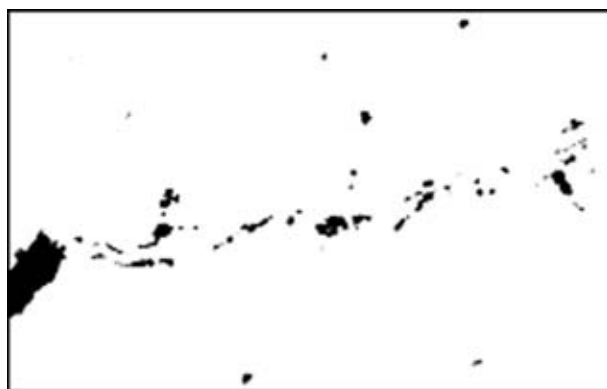


Рис. 2. Серия микротрещин в районе расположения неметаллических включений в металле сварного шва, $\times 420$

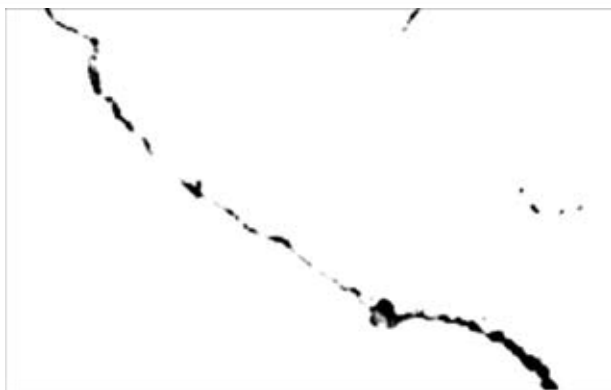


Рис. 3. Трещина, проходящая через экзогенные включения, $\times 420$

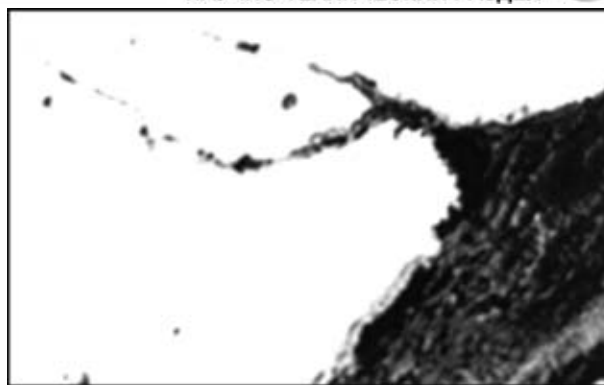


Рис. 4. Ответвление микротрещины по неметаллическим включениям в металле сварного шва, $\times 420$

нагрузки [2]. Исследование металла сварных швов в местах соединения наковален с балкой после окончания срока эксплуатации показало, что появление микротрещин происходит в районах скопления неметаллических включений (рис. 2). В условиях упругой деформации металла шва при передаче ударного импульса включения произвольной формы размером 1... 20 мкм провоцируют в сварных швах возникновение и дальнейший рост трещин. Магистральные и ответвляющиеся трещины наиболее часто проходят по включениям типа титалита ($Al_2O_3 \times TiO_2$), геленита ($CaO \times Al_2O_3 \times SiO_2$) и перовскита ($CaO \times TiO_2$) (рис. 3, 4).

Количество неметаллических включений в металле шва значительно больше, чем в основном металле и сварочной проволоке. Включения в металле шва являются не только продуктом раскисления в процессе сварки, но и следствием загрязнения шихтовых материалов, особенно ферросплавов в составе покрытия электродов. В покрытии электродов УОНИ-13/55 используют ферросилиций ФС-45, ферромарганец ФМн-1,0 и ферротитан ФТн30А.

В работе [3] показано, что при замене в покрытии электродов УОНИ-13/55 ферросплавов промышленного производства комплексным рафинированным ферросплавом электрошлаковой выплавки в наплавленном металле снижается содержание примесей и неметаллических включений типа титалита, геленита, перовскита и корунда. Уменьшение содержания неметаллических включений достигает 36 %, а тугоплавких, включающих оксид алюминия, — 50 %. При этом происходит формирование преимущественно глобулярных включений [4], что в меньшей мере влияет на снижение прочностных и пластических характеристик наплавленного металла. Однако полученные при кратковременных статических испытаниях даже сравнительно высокие показатели механических свойств металла сварного шва еще не являются гарантией надежности работы сварных швов в конструкциях, подверженных ударным и знакопеременным нагрузкам в течение требуемого срока эксплуатации. При интенсивной ударной нагрузке решающим фактором, определяющим прочность и надежность сварного соединения, является сопротивление усталостному разрушению.

Положительное влияние рафинирования металла при электрошлаковом процессе на его пластические свойства и предел усталости описано в

работах [5–7]. Для проверки выносливости металла, наплавленного электродами УОНИ-13/55, в покрытии которых использовали рафинированный электрошлаковым способом комплексный ферросплав [3], выполнены сравнительные испытания на выносливость металла сварного шва при симметричном нагружении. Исследования проводили на стыковых сварных образцах из стали СтЗсп размером 23 \times 150 мм, толщиной 5 мм с центральным отверстием 7 мм, сваренных промышленными электродами УОНИ-13/55 с отдельным введением ферросплавов в покрытие электродов и опытными электродами УОНИ-13/55, в покрытии которых использовали комплексный ферросплав электрошлаковой выплавки. Образцы для сварки вырезали вдоль направления проката. Пластины сваривали двусторонним швом в кондукторе электродами диаметром 4 мм при токе 160...180 А и напряжении на дуге 24...26 В. Усиление термически не обработанных сварных соединений зачищали заподлицо с основным металлом.

Пределы выносливости образцов (рис. 5) определяли в динамической лаборатории Запорожского национального технического университета на установке осевого циклического нагружения. Частота нагружения составляла 20...22 Гц, а точность поддержания амплитуды нагружения — 3 %. Построение левой ветви кривой усталости производили по методу наименьших квадратов. Среднеквадратичная

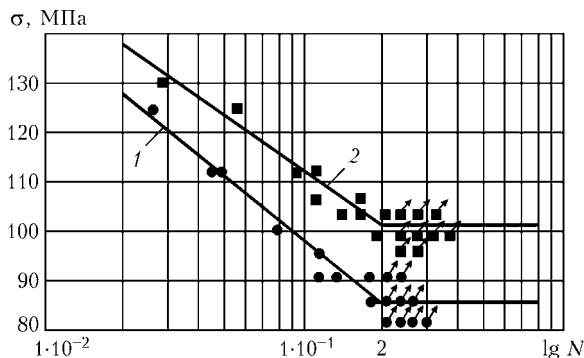


Рис. 5. Результаты испытания на выносливость металла сварного шва, выполненного электродами УОНИ-13/55: 1 — сварное соединение, выполненное электродами с отдельным введением в покрытие ферромарганца, ферросилиция и ферротитана; 2 — сварное соединение, выполненное электродами с введением в покрытие комплексного ферросплав электрошлаковой выплавки



тичное отклонение логарифма долговечности для образцов, сваренных электродами с отдельным введением ферросплавов и с комплексным ферросплавом электрошлаковой выплавки, равнялось соответственно 0,044 и 0,040.

Во всем диапазоне изменения нагрузок сопротивление усталости металла, наплавленного электродами с комплексным ферросплавом электрошлаковой выплавки выше, чем электродами с отдельным введением ферросплавов. С увеличением количества циклов нагружения эта разница в значениях предела усталости закономерно увеличивается в пользу сварных швов, выполненных электродами с комплексным ферросплавом в покрытии.

Пределы выносливости определяли по методике, приведенной в работе [8]. Шаг нагрузки составлял 4 МПа. Предел выносливости металла σ_{-1} , наплавленного промышленными электродами с отдельным введением ферросплавов, составил $(86,9 \pm 3,1)$ МПа, а среднеквадратичное отклонение $S_{\sigma_{-1}} = 3,36$. Для образцов металла, наплавленного опытными электродами с комплексным ферросплавом электрошлаковой выплавки, предел выносливости достигал $(100,7 \pm 3,4)$ МПа, а среднеквадратичное отклонение — 3,25. Доверительные интервалы получены для вероятности разрушения, равной 95 %. Таким образом, применение комплексного ферросплава электрошлаковой выплавки в покрытии электродов УОНИ-13/55 обеспечивает повышение предела выносливости наплавленного металла на 16 %.

Оценка стабильности полученных свойств произведена по коэффициенту вариации среднего значения предела выносливости $\bar{S}_{\sigma_{-1}} / \bar{\sigma}_{-1}$, характеризующего рассеяние показателей, который для металла шва электродов УОНИ-13/55 с отдельным введением ферросплавов в покрытие электродов оказался равным 0,04 и 0,033 — для электродов с комплексным ферросплавом электрошлаковой выплавки. Таким образом, при использовании комплексного ферросплава в покрытии электродов УОНИ-13/55 в 1,2 раза снижается рассеяние показателей предела выносливости наплавленного металла.

Способность металла сварных швов наковальня-балка встряхивания противостоять ударным нагрузкам в условиях работы встряхивающих устройств электрофильтров оценивали по результатам испытаний натуральных деталей, установленных на специальном ударном стенде, разработанном

совместно кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Запорожского национального технического университета и ОАО «Южветметгазоочистка». Стенд имитирует реальные энергетические параметры ударной нагрузки, которую воспринимает балка встряхивания электрического фильтра.

Испытания на базе $1 \cdot 10^6$ циклов натуральных моделей на ударном стенде показали, что в 18 % сварных швов, выполненных электродами УОНИ-13/55 с отдельным введением ферросплавов, визуально зафиксированы трещины, которые зарождались в области корня шва и развивались по наплавленному металлу. В сварных швах, выполненных опытными электродами с комплексным ферросплавом в покрытии, после $1 \cdot 10^6$ циклов испытаний визуально трещины не обнаружены.

Таким образом, при замене всех ферросплавов в покрытии электродов УОНИ-13/55 комплексным рафинированным ферросплавом электрошлаковой выплавки в результате уменьшения содержания неметаллических включений в металле сварного шва происходит повышение не только кратковременных механических свойств, определяемых при испытании металла, наплавленного такими электродами, но и предел выносливости металла сварного шва в процессе длительной эксплуатации при циклическом и ударном нагружении.

1. Бовсуновский А. П. К вопросу о механизме рассеивания энергии в трещине усталости // Пробл. прочности. — 2002. — № 5. — С. 80–99.
2. Электрофильтры в цветной металлургии / М. И. Биргер, А. Е. Гончаров, Г. М. Гордон, А. А. Гурвиц / Под ред. А. А. Гурвица. — М.: Металлургия, 1982. — 136 с.
3. Влияние состава ферросплавов на содержание и форму неметаллических включений в металле, наплавленном электродами УОНИ-13/55 / В. С. Попов, И. М. Билолик, С. П. Бережный, В. П. Пирожкова // Автомат. сварка. — 2000. — № 8. — С. 23–25.
4. Попов В. С., Билолик І. М., Бережний С. П. Зниження вмісту шкідливих домішок у металі шва при використанні комплексного розкислювача в покритті зварювальних електродів // Матеріалознавство та оброб. металів. — 2000. — № 3. — С. 58–61.
5. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
6. Усталость и хрупкость металлических материалов / В. С. Иванов, С. Е. Гуревич, И. М. Копьев, В. Г. Кудряшов. — М.: Наука, 1968. — 216 с.
7. Догаева В. А., Георгиев Н. М., Анучкин М. Н. Влияние рафинирования жидким синтетическим шлаком на вязкие свойства низколегированной строительной стали // Металловед. и терм. обраб. металлов. — 1966. — № 11. — С. 17–20.
8. Степнов М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. — М.: Машиностроение, 1972. — 232 с.

It is shown that a complex ferroalloy used instead of traditional ferroalloys, i.e. deoxidisers, in electrode coverings leads to decrease in the content of non-metallic inclusions in low-carbon weld metal, increase in its short-time mechanical properties and fatigue limit.

Поступила в редакцию 24.10.2003,
в окончательном варианте 09.02.2004