

УДК 621.791.75

Гринь А. Г., Жариков С. В., Залесный Д. И.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ СВАРКИ МЕДИ СО СТАЛЬЮ

Основное затруднение при сварке меди со сталью возникает вследствие существенной разницы в физико-химических свойствах свариваемых материалов, высокой теплопроводности меди и ее способности поглощать газы. Последнее, при сварке, вызывает появление в шве пор, окисных включений, трещин, что делает практически невозможным использование таких соединений для работы в условиях повышенного давления, влажности и температур [1].

Исследования по свариваемости меди и меди со сталью показывают, что на качество сварки оказывает влияние чистота меди и наличие примесей, способных раскислять медь.

При взаимодействии жидкой меди со сталью, в частности, при сварке и наплавке, образуются трещины, заполненные медью. Подобные явления связывают с раскисляющим действием жидкой меди, а также с особым энергетическим состоянием сплава на границах зерен и повышенной, вследствие этого, диффузией атомов жидкой фазы в кристаллическую решетку твердого металла [2].

Комплексная оценка механических свойств, термоциклической долговечности, характер разрушения образцов показали, что при эксплуатации сварных соединений низкоуглеродистая сталь – медь в условиях повышенных и переменных температур оптимальным является содержание 3...6 % железа в металле шва [3].

Илюшенко В.М. и Подгаецкий В.В. предложили плавленный флюс для сварки и наплавки меди и ее сплавов, в который с целью улучшения механических свойств металла сварных швов введен фтористый натрий в количестве 5...15 %, а остальные компоненты взяты в следующем соотношении (в %): $\text{SiO}_2 = 16...22$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25...35$; $\text{MgO} = 5...10$; $\text{CaO} = 5.. 15$; $\text{CaF}_2 = 20...25$; $\text{MnO} \leq 0,5$ [4].

Для ручной дуговой сварки меди и ее сплавов, а также меди со сталью предложено ряд марок покрытых электродов [5, 6]. Наиболее широкое применение получили электроды марок «Комсомолец 100» [5]. В результате сварки листовой стали Ст 3 толщиной 3 мм и меди марки МО толщиной 14 мм в тавр электродами «Комсомолец 100», на постоянном токе обратной полярности с предварительным подогревом до 750...800 °С, установлено, что сварной шов формируется хорошо, трещины и поры в сварных швах отсутствуют [5]. Выполнение сварки с подогревом металла ниже 600...650 °С ухудшает формирование шва, образуются наплывы на меди и подрезы на стали. Со стороны стали возникает небольшая пористость, свидетельствующая о недостаточной степени раскисления металла шва [6].

В работе [7] рассмотрено совершенствование технологии сварки под флюсом АН-60 меди со сталью проволокой марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2, установлено, что получение качественных швов одним электродом с толщиной свариваемых кромок от 5 до 10 мм зависит от разделки кромок, режима сварки, длины смещения электрода от линии стыка на медь.

Определению оптимального состава металла шва при сварке плавлением меди с низкоуглеродистой сталью посвящена работа [6, 7]. Показано, что соотношение 52 % меди и 42 % железа обеспечивает двухфазную структуру, представляющую собой измельченные зерна сплава на основе меди между которыми расположены зерна сплава на основе железа.

Для получения бездефектного сварного шва, обеспечения необходимого уровня раскисления меди и оптимального соотношения медь / железо в металле шва, перспективным является применение самозащитных порошковых проволок трубчатой конструкции.

Исходя из этого, разработка и применение электродных материалов, обеспечивающих требуемые свойства металла шва, позволяющих применять механизированные способы сварки без дополнительной защиты сварочной дуги, является весьма актуальной.

Цель настоящей работы – совершенствование состава самозащитной порошковой проволоки (СПП), обеспечивающей отсутствие в металле шва дефектов в виде пор, трещин, шлаковых включений, несплавлений и подрезов основного металла, а также определение оптимального соотношения железо / медь в металле шва.

Выбор состава шихты порошковой проволоки для сварки меди со сталью осуществлялся с учетом вышеперечисленных особенностей процесса. Для изготовления опытных порошковых проволок использовалась медная лента марки М1 размером 0,5x15 мм. С целью качественного изготовления порошковых проволок, через первую фильеру волочение производили при вытяжке $\mu = 1,2 \dots 1,3$. При таком коэффициенте вытяжки улучшается условие смазки проволоки в первой волоке, и предотвращается чрезмерное напряжение волочения, определяемое для первой протяжки суммой сил сопротивления протягиванию ленты через холостые формовочные ролики и деформации проволоки в первой волоке. При больших вытяжках возможен разрыв оболочки. Важным условием нормального процесса волочения порошковой проволоки через первую фильеру, обеспечивающий заданный ее состав, является выполнение следующего соотношения :

$$\frac{S_0}{S_\phi} < 1 \quad (1)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения порошковой проволоки, мм²; S_ϕ – площадь поперечного сечения фильеры конической формы 7 с углом рабочего конуса $2\alpha = 12 \dots 18^\circ$.

Соотношение (1) является технологическим показателем волочения порошковой проволоки, позволяющий оценить возможность изготовления проволоки заданного состава. Если это соотношение > 1 , то произойдет кольцевой разрыв оболочки. В этом случае следует увеличить диаметр первой фильеры.

Во втором и третьем переходе, где сердечник еще недостаточно уплотнен, назначали максимальную деформацию, превышающую величину разового среднего обжатия. Величина разового обжатия для проволоки с оболочкой из меди М1, и мягким сердечником достигала 30...35 %. В последующих переходах деформации плавно уменьшали. При волочении медной проволоки до диаметра 3,5 мм усилия протяжки практически не меняются и только с уплотнением сердечника возрастает сила трения на границе «сердечник – внутренняя поверхность оболочки», что приводит к интенсификации процесса утонения оболочки [8]. Протяжка проволок в медной оболочке производилась через фильеры, диаметр которых последовательно уменьшался на 0,2 мм.

Состав сердечника порошковой проволоки для сварки меди состоит из алюминиевого порошка, титанового порошка, циркония, медного порошка, марганца, кремния, CaF_2 , Na_2SiF_6 . С целью увеличения жидкотекучести расплавленного шлака в состав сердечника вводились фторидные соли. Введение соединений фтора обеспечивалось применением плавикового шпата и кремнефтористого натрия. В качестве первоначального критерия при выборе газшлаковой основы сердечника приняты сварочно-технологические свойства порошковой проволоки. Такому критерию в наибольшей мере соответствует шлакообразующая система плавиковый шпат – нефелиновый концентрат. Минерал нефелин представляет собой натриево-калиевый алюмосиликат $(\text{NaK})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. При изготовлении проволок применялся нефелиновый концентрат следующего состава (%): $\text{SiO}_2 = 42,0$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 31,0$; $\text{CaO} = 1,1$; $\text{Na}_2\text{O} = 12,4$; $\text{K}_2\text{O} = 6,9$.

Сварка осуществлялась на сварочном автомате А-874 на постоянном токе обратной полярности. В качестве источника питания применялся сварочный выпрямитель ВС-1000.

Режимы сварки: сварочный ток составлял 300...350 А, напряжение на дуге 24...26 В; скорость подачи проволоки 210 м/ч, диаметр проволоки – 2,5 мм, скорость сварки 19 м/ч.

Во время сварки фиксировали стабильность процесса, а после сварки – кроющую способность шлака, его отделимость, формирование швов, наличие дефектов. В результате исследования установлено, что при повышенных содержаниях плавикового шпата (более 30 %) шлаковая корка полностью покрывает поверхность наплавленного валика и сравнительно легко отделяется от металла шва при хорошем его формировании. Внешних дефектов на поверхности шва не обнаружено.

Повышение количества нефелинового концентрата до 30 % также вызывает некоторое ухудшение кроющей способности шлака. Однако отделимость шлаковой корки и формирование валиков практически не изменяются. Дефектов на поверхности швов, кроме кратеров не наблюдается. В кратерах при наплавке на стальные пластины возможно образование трещин. В начале швов при наплавке на медные пластины имели место поры, которые в дальнейшем по всей длине шва отсутствуют. Это вызвано большой скоростью остывания и кристаллизации сварочной ванны в начале шва, вследствие еще малого разогрева образца. При дальнейшем повышении количества нефелинового концентрата в составе сердечника все указанные свойства ухудшаются. При этом повышается чувствительность металла шва к пористости.

С выведением нефелинового концентрата из состава сердечника проволоки отделимость шлака существенно ухудшается, даже при повышенных содержаниях плавикового шпата.

При дуговой сварке меди со сталью, кромка стальной детали подвергается воздействию дуги. Глубина проплавления стальной кромки должна быть минимальной для ограничения содержания железа в металле шва, что позволит обеспечить высокие механические свойства соединения и уменьшить вероятность образования кристаллизационных трещин. Поэтому исследовали влияние состава шлаковой системы сердечника проволоки на глубину проплавления, предполагая, что соотношения шлако-газообразующих компонентов может являться одним из критериев оценки. Изменение количества нефелинового концентрата в составе порошковой проволоки за счет снижения содержания плавикового шпата практически не влияет на глубину проплавления.

Таблица 1

Влияние состава шлакообразующей системы на технологические характеристики металла шва

Отношение нефелиновый концентрат/плавиковый шпат	0,17	0,75	1,25	2,25	3,50
Глубина проплавления, мм	4,0	4,3	4,2	4,4	4,5
Содержание азота, %	0,037	0,038	0,041	0,041	0,046
Содержание кислорода, %	0,039	0,046	0,049	0,048	0,058
Содержание неметаллических включений, %	0,046	0,046	0,052	0,058	0,060

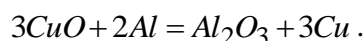
При повышении величины отношения нефелиновый концентрат / плавиковый шпат растет количество, как газов, так и неметаллических включений. Некоторое повышение содержания азота в металле шва при достаточно надежной газовой защите получено в результате диссоциации фторидов (CaF_2 , Na_2SiF_6), а также существенный рост количества неметаллических включений обуславливается повышением кислотности шлака за счет алюмосиликатов $(\text{NaK})_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Одним из недостатков СПП ограничивающих их применение, являются разные скорости плавления оболочки и наполнителя, образующего сердечник. Отставание плавления сердечника от плавления оболочки вызывает ухудшение показателей сварки и снижение эффективности защиты металла от воздуха. Замедленное плавление сердечника к тому же затрудняет сварку короткой дугой, частицы не расплавившегося сердечника, попадая в сварочную ванну, засоряют металл шва. В результате чего образуется химическая и механическая неоднородность сварного соединения. Причем отставание плавления проявляется не зависимо от способа заполнения оболочки, (порошки, прессованные таблетки или спеченные гранулы) [9–11].

Важным резервом повышения скорости плавления сердечника СПП является введение в состав их шихты экзотермических смесей [9–11]. Тепловой эффект экзотермических реакций дополняет тепло сварочной дуги и увеличивает удельное количество расплавленного присадочного металла.

В процессе выбора состава экзотермической смеси для применения в экспериментальных проволоках произведена оценка тепловых эффектов взаимодействия различных элементов - раскислителей с окислителем CuO. В качестве раскислителей применялись Al, Ti, Mn, Si, Zr.

Тепловой эффект взаимодействия элемента - раскислителя с окислителем оценивали по реакции наиболее активного раскислителя - алюминия с оксидом меди



Тепловой эффект от 1г этой экзотермической смеси составит

$$q^{Al} = \frac{\Delta H_{298}^{Al}}{M} \quad (2)$$

где ΔH_{298}^{Al} – энтальпия системы в нормальных условиях, кДж/моль; M – сумма молекулярных масс исходных веществ, г/моль.

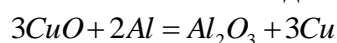
$$q^{Al} = \frac{1205,5}{292,6} = 4,12 \text{ кДж/г.}$$

Аналогичным образом рассчитывались тепловые эффекты на 1 г экзотермической смеси для реакций выше указанных элементов раскислителей с CuO. Расчеты показали, что наибольший тепловой эффект достигается при использовании Al ($q^{Al} = 4,12$ кДж/г), остальные элементы по своей эффективности составляют следующий ряд: Si (3,2 кДж/г), Zr (3,14 кДж/г), Ti (3,056 кДж/г), Mn (1,7 кДж/г).

Использование в экзотермической реакции в качестве окислителя оксида меди, приводит к восстановлению меди и повышению производительности наплавки.

Таким образом, на основе термодинамических расчетов и литературных данных в качестве составляющих экзотермической смеси выбрали оксид меди и алюминиевый порошок, которые используются в дальнейших исследованиях.

Известно [12–15], что для СПП эффективным является применение экзотермической смеси: окислитель – раскислитель, в соотношении 4:1, при содержании 40 масс. % ее в составе шихты проволоки. Для протекания устойчивой экзотермической реакции в сердечнике проволоки содержание CuO составляет 6,4 масс.% от состава проволоки с коэффициентом заполнения $K_3 = 0,2$. Взаимодействие алюминия с оксидом меди протекает по реакции:



Количество восстановленной меди в результате протекания экзотермической реакции определяется из соотношения:

$$\frac{M_{ок}}{M_{Cu}} = \frac{Q_{ок}}{Q_{Cu}} \quad (3)$$

где $M_{ок}$ – молярная масса оксида меди, моль; M_{Cu} – молярная масса меди, моль; Q_{Cu} – количество восстановленной меди, масс. %; $Q_{ок}$ – количество оксида меди в составе шихты СПП, масс. %.

Анализ полученных данных показывает, что в результате протекания экзотермической реакции, при плавлении СПП из оксида меди восстанавливается 79,7 % меди. Следовательно, потери на шлакообразование и угар составляют 20,3 %.

При наплавке СПП с экзотермической смесью протекает металлургический процесс, связанный с восстановлением меди из оксида. В связи с этим необходимо учесть количество оксида меди в составе шихты порошковой проволоки. Коэффициент расплавления α_p описывается выражением:

$$\alpha_p = \frac{m_{np} [1 - \kappa_z \cdot (Q_{гш} + Q_{ок} \cdot \kappa_{ш})] \cdot 3600}{I_{св} \cdot t}, \quad (4)$$

где $Q_{ок}$ – относительное количество оксида в составе шихты СПП; $\kappa_{ш}$ – потери на шлакообразование и угар в результате протекания экзотермической реакции; m_{np} – масса расплавленной порошковой проволоки, г; κ_z – коэффициент заполнения порошковой проволоки; $Q_{гш}$ – относительное количество газослакообразующих в составе шихты СПП; t – время наплавки, с.

При наплавке СПП с экзотермической смесью на стальную пластину, в сравнении с наплавкой порошковой проволокой содержащей смесь медного и алюминиевого порошков, наблюдается уменьшение глубины проплавления. Это связано с возрастанием общей тепловой мощности, что является причиной увеличения жидкой прослойки. Наличие такой прослойки приводит к уменьшению теплопередачи от дуги к основному металлу через увеличенный слой жидкого металла в сварочной ванне, а, следовательно, и к уменьшению глубины проплавления. Уменьшение глубины проплавления стальной пластины и увеличение производительности плавления СПП способствует уменьшению доли железа в шве при выполнении сварных соединений меди со сталью. Для определения содержания меди и железа в металле шва выполнялась сварка медной и стальной пластины внахлест на постоянном токе обратной полярности 300 А, напряжении 24 В, скорость сварки 19 м/ч. Спектральным анализом установлено среднее содержание $Cu = 73,8 \%$, $Fe = 17,6 \%$ при сварке проволокой с экзотермической смесью. При сварке аналогичных образцов без экзотермической смеси содержание железа выше в 1,8 раза.

Таким образом, введение экзотермической смеси в состав шихты сердечника СПП приводит к увеличению ширины наплавленного валика, и уменьшению глубины проплавления, что важно с точки зрения уменьшения склонности металла сварного шва к образованию кристаллизационных трещин.

ВЫВОДЫ

Установлено, что уменьшение содержания плавикового шпата за счет увеличения нефелинового концентрата в составе порошковой проволоки не влияет на глубину проплавления стальной пластины, но при этом увеличивается содержание неметаллических включений и содержание газов в металле шва, чему способствовало уменьшение фторидных соединений и увеличение силиката в сердечнике проволоки.

Определено влияние окиси меди и алюминия, как экзотермической смеси на глубину проплавления стальной пластины, что обеспечивает снижение содержания железа в сварном шве при выполнении соединения меди со сталью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. – Киев. – Наукова думка.– 1990. – 510 с.
2. Аснис Е.А. Особенности сварки меди с хромоникелевой аустенитной сталью типа 1808 / Е.А. Аснис, В.М. Прохоренко // Автоматическая сварка – 1963.– №7.– С. 14–17.
3. Павлюк В.Н. Свойства метала сварных швов соединений медь – низкоуглеродистая сталь при повышенных температурах и их сопротивление термической усталости / В.Н. Павлюк, А.П. Ротач, А.В. Вечер // Проблемы прочности. – 1986. – №3. – С.15–19.
4. Илюшенко В. М. Механизированная сварка фурм кислородного дутья мартеновских печей / В. М. Илюшенко, В. М. Кулик, Г. С. Артеменко // Автоматическая сварка: науч.-техн. и произв. журн. – 1970. – № 8. – С. 72–75.
5. Сыроваткин А.А. Некоторые особенности сварки стали с медью / А. А. Сыроваткин // Автоматическая сварка. – 1970. – № 4.
6. Шехтер С.Я. Сварка медисталью при изготовлении фурм доменных печей / С.Я. Шехтер, А.М. Резницкий, В.В. Пянков // Автоматическая сварка. – 1973. – №11. – С.55–57.
7. Коледа В.Н. Совершенствование технологи сварки под флюсом меди со сталью / В. Н. Коледа // Автоматическая сварка.– 2012.– №3.– С.50–54.
8. Гринь А. Г. Исследование процесса волочения порошковых проволок / А. Г. Гринь, А. В. Свиридов, И. А. Бойко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 1 (22). – С. 62–66.
9. Шлепаков В.Н. Порошковые проволоки с металлическим сердечником для сварки в среде защитных газов / В.Н. Шлепаков, А.В. Биленец // Автоматическая сварка. – 2003. – №3. – С. 53–54.
10. Рак П.И. Порошковые проволоки нового покала для сварки в средезащитныхгазов / П.И. Рак, П.А. Косенко // Сб. докладов 2 Межд. конф. по сварочным материалам стран СНГ. Дуговая сварка. Материалы и качество на рубеже 21в. – Орел, 2001. – С 57–59.
11. Гринь А.Г. Влияние углеродообразующего компонента порошковой проволоки на образование неметаллических включений в наплавленном металле / А.Г. Гринь, І.О. Бойко, М.С. Дегтяренко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 2 (19). – С. 83–87.
12. Жариков С. В. Влияние экзотермической смеси, входящей в состав наполнителя самозащитной порошковой проволоки на повышение производительности наплавки / С. В. Жариков, В. М. Карпенко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2002. – №7 (53). – С. 133–137.
13. Куплевацкий Л. М. Уменьшение отставания плавления сердечника от оболочки при наплавке порошковой проволокой / Л. М. Куплевацкий, М. Г. Ливищиц, С. А. Шоно // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки: материалы научно-технической конференции. – К. : Наукова думка, 1984. – 100 с.
14. Карпенко В. М. Выбор режимов наплавки порошковой проволокой для упрочнения деталей металлоконструкций / В. М. Карпенко, С. В. Жариков, С. Г. Плис // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ, 2000. – Вип. 5. – С. 277–280.
15. Пат. 41131 Україна, МПК⁷ В 23 К 35/40. Склад порошкового дроту для зварювання міді / Гринь О. Г. , Свиридов О. В., Жаріков С. В. – № и2008 12899; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9. – 3 с.

Статья поступила в редакцию 14.05.2016 г.