



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ МЕДИ СО СТАЛЬЮ

В. Н. КОЛЕДА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований влияния некоторых технологических приемов на содержание железа в металле швов соединений меди со сталью при сварке под флюсом. Разработан новый способ сварки меди со сталью расщепленным электродом, состоящим из проволок различных диаметров, который позволяет регулировать тепловложение в медную и стальную кромок, упрощает процесс слежения электрода по стыку, обеспечивает получение сварных швов требуемого качества.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, расщепленный электрод, две проволоки, разнородные соединения: медь+сталь, разделка кромок, режимы сварки, смещение электрода, механические свойства соединений

Широкое применение меди в качестве конструкционного материала на предприятиях металлургической и электротехнической отраслей промышленности сопряжено с трудностью обеспечения высокой работоспособности сварных соединений медных изделий, эксплуатируемых в условиях повышенных температур, давлений, агрессивных сред и др. Особенно это касается сварных соединений меди со сталью, поскольку эти металлы характеризуются разными значениями теплопроводности, температуры плавления, коэффициентов линейного и объемного расширения [1]. В этой связи актуальным является совершенствование технологических процессов соединения данных металлов.

Анализ литературных данных показал, что сварка под флюсом является наиболее перспективной для получения соединений меди со сталью толщиной 5...40 мм. Она отличается высокой производительностью и КПД дуги, часто позволяет сваривать металл средних и больших толщин без предварительного подогрева за один проход [2, 3]. Кроме того, этот процесс обеспечивает высокий уровень качества и стабильности свойств сварных соединений, характеризуется улучшенными санитарно-гигиеническими условиями труда. В то же время одним из недостатков сварки под флюсом является невозможность визуального наблюдения за процессом кристаллизации металла шва.

При выполнении сварных соединений меди со сталью в условиях дуговой сварки стальная кромка подвергается непосредственному воздействию дуги. Проплавление стальной кромок должно быть минимальным для ограничения содержания железа в металле шва, обеспечения требуемой пластичности соединений и уменьшения склон-

ности металла швов к образованию кристаллизационных трещин [4, 5].

Изучение физико-механических свойств сварных соединений медь–низкоуглеродистая сталь, эксплуатирующихся при высоких значениях переменных температур [6, 7], показало, что при массовой доле железа до 2 % металл сварного шва равнопрочен основному металлу (меди) во всем температурном интервале. Содержание железа в меди более 7 % вызывает резкое снижение пластических свойств соединений, что может привести к образованию горячих трещин. Комплексная оценка механических свойств, длительной прочности, термоциклической долговечности, количества накоплений до разрушения знакопеременной пластической деформации и характера разрушений показала, что при эксплуатации сварных соединений низкоуглеродистая сталь–медь в условиях повышенных и переменных температур оптимальным является содержание 3...6 % железа в металле шва.

Цель настоящей статьи — совершенствование технологии сварки меди со сталью под флюсом, обеспечивающей отсутствие в металле шва сварных соединений дефектов в виде пор, непроваров, трещин, шлаковых включений, несплавлений с основным металлом, подрезов, а также получения оптимального содержания железа в металле швов (от 3 до 6 %) и упрощения процесса слежения электрода по линии сварки.

Для отработки оптимальной технологии сварки меди со сталью разных толщин проведены серии экспериментов, в которых варьировали угол разделки стальной и медной кромок от 0 до 45°, диаметры сварочной проволоки от 2 до 4 мм, длину смещения электрода в сторону меди на 0,2...1,2 толщины свариваемого металла. При сварке образцов меди со сталью толщиной (5+5), (10+10), (20+20) мм режимы сварки изменяли в соответствии с толщиной в следующих пределах: сварочный ток — 300...450, 500...700, 1000...1300 А,

напряжение на дуге — 32...38, 34...40, 40...46 В, скорость сварки 18...20, 16...18, 8...10 м/ч.

Сварку выполняли проволокой марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 под флюсом марки АН-60. Проволоку перед сваркой подвергали механической очистке, флюс прокачивали при температуре 400...450 °С в течение 2 ч. Поверхность образцов из меди М1 (0,01 % О) и стали Ст3 очищали зачистными кругами для предотвращения попадания грязи или оксидов в зону сварки. С целью увеличения стойкости сварных соединений против пористости применяли способ дополнительной газовой защиты под флюсом [8].

Для сварки использовали сварочную головку АБС, расположенную над подвижным столом, и источник питания ВСЖ-1600. Процесс осуществляли на токе обратной полярности при жесткой характеристике источника питания.

Во время сварки фиксировали стабильность процесса, после сварки — отделимость шлаковой корки и формирование швов. Путем визуального осмотра швов, изучения макро- и микрошлифов фиксировали непровары, несплавления, шлаковые включения, трещины, поры и другие дефекты. Затем из верхней части швов отбирали стружку для определения в металле швов содержания железа по методу «мокрой» химии. Исследования показали, что процесс сварки во всех случаях протекал стабильно, отделимость шлаковой корки и формирование швов были хорошими. Поры и другие дефекты в металле швов не обнаружены.

В зависимости от свариваемых толщин выбраны оптимальные режимы сварки и диаметры проволоки, позволяющие получать полный провар свариваемых кромок, хорошее формирование швов и отделимость шлаковой корки.

Установлено, что оптимальной для всех свариваемых толщин является разделка стальной кромки под углом 30°. Медную кромку можно не разделять. При сварке стыков толщиной 20 мм разделка медной кромки на 30° позволяет улучшить формирование швов, хотя это приводит к незначительному увеличению содержания железа в них. Разделка стальной кромки под углом 45° способствует возникновению несплавлений со стороны стали, особенно на свариваемых толщинах 5 и 10 мм. При сварке образцов толщиной 20 мм такая разделка может применяться в случаях, когда медную кромку не разделяют, однако при этом возможно уменьшение содержания железа в металле швов ниже 3 %.

В дальнейших опытах стальную кромку разделяли под углом 30°, а медную не разделяли для всех свариваемых толщин.

Проведенные исследования (рис. 1) показали, что содержание железа в металле швов в рекомендованных пределах 3...6 % для свариваемых толщин 5 мм обеспечивается при смещении элект-

рода от линии стыка в сторону меди на 2...3 мм, толщин 10 мм — на 5...7 мм, толщин 20 мм — на 8...10 мм.

Смещение электрода в сторону меди на длину, меньшую, чем в указанных пределах, приводит к резкому возрастанию содержания железа в металле швов и возможным несплавлениям с медной кромкой, что может быть связано с перебрасыванием дуги на стальную кромку.

При смещении электрода в сторону меди на длину, большую чем в указанных пределах, подплавление стальной кромки происходит только за счет тепла ванны жидкого металла, а это вызывает уменьшение содержания железа в металле швов, образование на границе сплавления шов-сталь соединений типа паяных. Могут также возникать несплавления со стороны стали.

Отмечено, что в начале сварки меди со сталью толщиной 20 мм могут образовываться дефекты в виде несплавления со стороны стальной кромки или неполного провара медной кромки. При окончании сварки шов может смещаться в сторону стали, что способствует резкому росту содержания железа в нем и образованию поперечных трещин. В начальный момент сварки температура медной пластины имеет низкие значения, что приводит как к уменьшению глубины проплавления медной кромки, так и снижению подвижности дуги, вызывая при этом сужение швов. Поэтому до наступления равновесия между вкладываемой тепловой мощностью и теплоотводом в медную пластину возможны случаи непроваров или несплавления со стороны стальной кромки.

В конце сварки краевой эффект вызывает повышение температуры свариваемых кромок по мере приближения сварочной ванны к краю пластин, что способствует увеличению подвижности дуги, расширению ванны жидкого металла. В результате более интенсивное оплавление стальной кромки приводит к увеличению содержания железа в металле швов. Особенно опасны случаи,

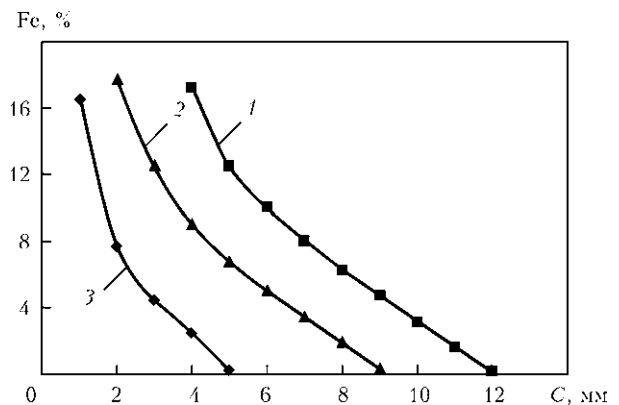


Рис. 1. Зависимость содержания железа в металле швов от длины смещения *C* электрода в сторону меди при сварке одним электродом меди со сталью с разной толщиной кромок: 1 — (5+5); 2 — (10+10); 3 — (20+20) мм



когда дуга перебрасывается на стальную кромку. При этом шов смещается в сторону стали, а резкое возрастание содержания железа в нем может привести к возникновению поперечных трещин.

При сварке образцов с толщиной кромок 5 и 10 мм такие дефекты обычно не обнаруживаются. Для сварочных стыков с толщиной кромок 20 мм опасная зона в начале и конце сварки может составлять несколько сантиметров.

Могут возникать также дефекты в сварных соединениях при перебрасывании дуги на стальную кромку из-за случайных отклонений сварочной проволоки от оси ее подачи или при биениях сварочной головки в ходе ее перемещения. Это опасно потому, что дуга один раз «зацепившись» за стальную кромку продолжает гореть с наклоном в сторону стали даже после восстановления всех параметров сварки. Зачастую это происходит при сварке меди со сталью с толщиной кромок 20 мм, что не позволяет получать качественные соединения при выполнении процесса одним электродом.

Выбранные режимы сварки меди со сталью толщиной 5 и 10 мм, разделка кромок и другие технологические параметры были рекомендованы для сварки фурм на Константиновском металлургическом заводе им. Фрунзе. Промышленное опробование этой технологии показало хорошие результаты.

Внедрение сварки под флюсом для приварки стального кольца, полученного с применением рафинирования жидкого металла при плавке [9], к литому медному рыльцу фурмы (рис. 2) позволило заменить ручную сварку неплавящимся электродом в аргоне, избежать необходимости предварительного подогрева изделия, упростить процесс сварки и повысить качество соединений.

Поскольку при сварке меди со сталью одним электродом незначительные отклонения последнего от оси сварки могут привести к ухудшению качества сварных соединений, а в промышленных условиях выдерживать минимальное отклонение в заданных пределах довольно сложно, представ-



Рис. 2. Внешний вид фурмы после сварки медного рыльца со стальным кольцом

ляло интерес разработать технологические приемы, обеспечивающие получение качественных сварных соединений в более широких пределах возможных отклонений электрода от оси сварки. Эти приемы также позволяют исключить возникновение брака в начале и конце сварки. Одним из таких способов может быть способ сварки расщепленным электродом, который задает требуемую ширину швов и уменьшает ток на дуге, горящей со стороны стальной кромки, что, по нашему мнению, должно положительно сказываться на качестве сварных соединений. Для предотвращения появления пор при сварке меди со сталью расщепленным электродом использовали плавлено-агломерированный флюс [10].

С целью изучения возможности применения расщепленного электрода для сварки меди со сталью с толщиной кромок 10 и 20 мм были проведены серии экспериментов, в которых исследовали влияние расстояния между электродами, режимов сварки, разделки кромок и смещения электродов от линии сварки на качество сварных соединений.

Результаты исследования влияния расстояния между проволоками в расщепленном электроде на глубину проплавления медной кромки (рис. 3) показали, что применение расщепленного электрода и увеличение расстояния между проволоками в нем приводит к уменьшению глубины проплавления свариваемых кромок. Отмечено, что на свариваемых стыках с толщиной кромок 20 мм при расстоянии между проволоками в расщепленном электроде 18 мм и более происходит образование двух отдельных ванн. Выбраны оптимальные расстояния между проволоками в расщепленном электроде — 0,5...0,7 толщины свариваемых кромок.

Поскольку глубина проплавления свариваемых кромок при указанном расстоянии между проволоками была примерно на 20 % меньше, чем при сварке одним электродом на тех же режимах, потребовалось соответственно увеличить сварочный ток на расщепленном электроде.

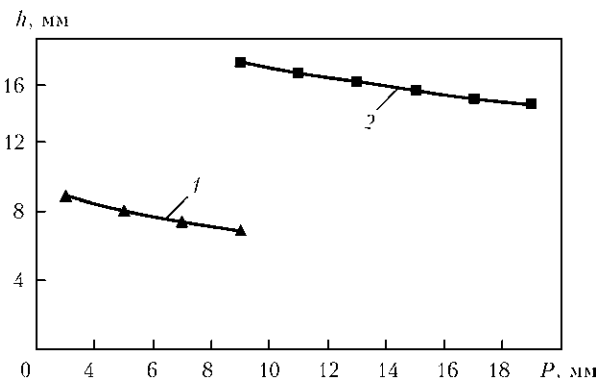


Рис. 3. Влияние расстояния P между проволоками на глубину проплавления кромок h при сварке расщепленным электродом меди со сталью с разной толщиной кромок: здесь и на рис. 4–6: 1 — (10+10); 2 — (20+20) мм

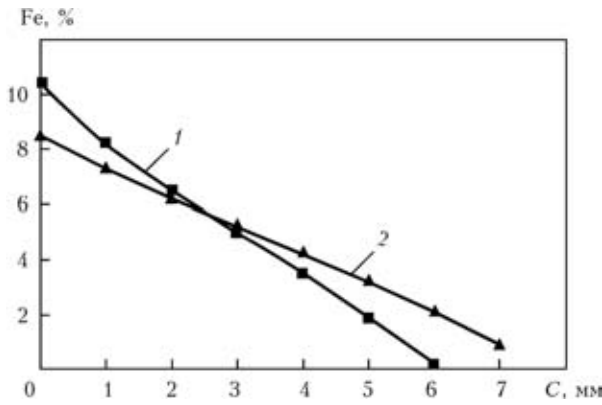


Рис. 4. Зависимость содержания железа в металле швов от длины смещения C электрода в сторону меди при сварке расщепленным электродом меди со сталью с разной толщиной кромок

Как следует из рис. 1, 4, при сварке с расщепленным электродом расширяются пределы возможных отклонений оси сварки по сравнению со сваркой одним электродом. Однако необходимость увеличивать ток на 20 % и более, а также устанавливать смещение электрода на заданное расстояние от линии стыка и строго выдерживать его во время сварки не позволяет рекомендовать этот способ для проведения дальнейших лабораторных и промышленных испытаний.

На основании результатов, полученных при сварке расщепленным электродом, состоящим из проволок одинакового диаметра, предложено применять для сварки меди со сталью расщепленный электрод из проволок различного диаметра, благодаря чему можно регулировать тепловложение в медную и стальную кромки.

Как видно из рис. 3, 5, применение способа сварки расщепленным электродом, состоящим из проволок разного диаметра (диаметр проволоки со стороны стали составляет 30...40 % диаметра проволоки со стороны меди), позволило увеличить глубину проплавления свариваемых кромок по сравнению со способом сварки расщепленным электродом, состоящим из проволок одинакового

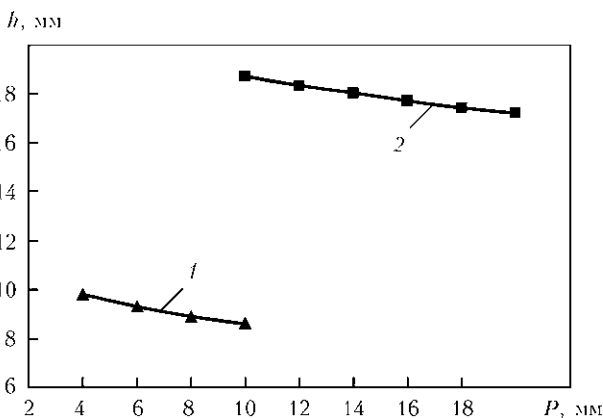


Рис. 5. Влияние расстояния P между проволоками на глубину проплавления кромок h при сварке расщепленным электродом, состоящим из проволок разного диаметра, меди со сталью с разной толщиной кромок

диаметра. При этом режимы сварки в обоих случаях были одинаковыми.

Отмечено, что при сварке расщепленным электродом, состоящим из проволок разного диаметра с расстоянием между ними более 18 мм, обнаружена тенденция к образованию двух отдельных ванн жидкого металла. Оптимальные расстояния между проволоками в расщепленном электроде составляют 0,5...0,8 толщины свариваемых кромок. При этом целесообразно увеличить ток примерно на 10 % по сравнению со сваркой одним электродом.

Для изучения влияния смещения электрода от линии стыка на содержание железа в металле швов осуществлена серия опытов по сварке стыков меди со сталью с толщиной кромок 10 и 20 мм. Смещение расщепленного электрода, состоящего из проволок разного диаметра, изменяли в диапазоне 0...4 мм от линии стыка в сторону меди и в сторону стали. Стальную кромку разделявали под углом 30°, медную — не разделявали.

Как следует из рис. 6, применение расщепленного электрода, состоящего из проволок разного диаметра, позволило значительно увеличить пределы возможных отклонений электродов от линии сварки и при этом обеспечить гарантированно высокое качество сварных соединений.

С учетом полученных результатов целесообразно выставлять проволоку меньшего диаметра по линии стыка, а заданное расщепление автоматически определит длину смещения проволоки большего диаметра на медь. При этом значительно упрощается операция подготовки перед сваркой и исключается возможная ошибка оператора, случайное отклонение электрода от линии сварки не оказывает значительного влияния на качество сварных швов.

Соблюдение данных рекомендаций дает возможность получать качественные швы с содержанием железа от 3 до 6 %, что обеспечивает высокий уровень их механических свойств при

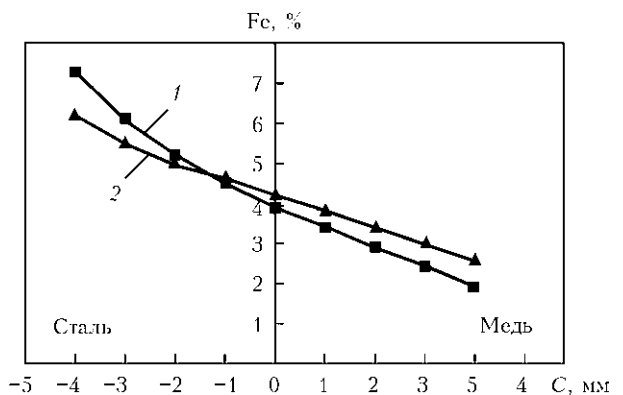


Рис. 6. Зависимость содержания железа в металле швов соединений меди со сталью от длины смещения C электрода в сторону меди при сварке расщепленным электродом, состоящим из проволок разного диаметра



Рис. 7. Внешний вид сварных образцов меди со сталью после их испытания на изгиб

комнатных и повышенных температурах, а также избежать образования дефекта в начале и конце сварки. Образцы таких соединений при испытании на разрыв разрушаются по основному металлу (меди) при $\sigma_b = 200...210$ МПа и выдерживают угол загиба 180° (рис. 7). Усовершенствованная технология сварки расщепленным электродом из проволок разного диаметра была опробована при сварке меди со сталью с толщиной кромок 20 мм для неразъемных плит кристаллизаторов непрерывной разливки стали и может быть рекомендована для широкого промышленного внедрения.

Выводы

1. Выбраны оптимальные разделки кромок, режимы сварки, длина смещения электрода от линии стыка на медь, обеспечивающие получение качественных швов при сварке меди со сталью одним электродом с толщиной свариваемых кромок от 5 до 10 мм.

2. Установлено, что при сварке меди со сталью одним электродом с толщинами свариваемых кромок 20 мм могут возникать дефекты в начале или конце швов, что не гарантирует получение качественных сварных соединений.

3. Опробование способа сварки расщепленным электродом, состоящим из двух проволок одинакового диаметра, показало, что при сварке меди

со сталью для выполнения качественных швов необходимо увеличить сварочный ток на 20 % и более по сравнению со сваркой одним электродом.

4. Предложенный способ сварки меди со сталью расщепленным электродом, состоящим из двух проволок разных диаметров, позволяет регулировать тепловложение в медную и стальную кромок, а также упрощает слежение электрода по линии стыка. Эту усовершенствованную технологию можно рекомендовать для сварки меди со сталью с толщиной свариваемых кромок от 10 до 20 мм.

1. *Гуревич С. М.* Справочник по сварке цветных металлов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 510 с.
2. *Шехтер С. Я., Резницкий А. М., Пянков В. В.* Сварка меди со сталью при изготовлении форм доменных печей // Автомат. сварка. — 1973. — № 11. — С. 55–57.
3. *Илюшенко В. М., Босак Л. К., Гришин Л. И.* Автоматическая сварка под флюсом меди со сталью больших толщин // Там же. — 1966. — № 6. — С. 73.
4. *Иващенко Г. М., Дзжевага И. М., Лебедев О. М.* Механические свойства соединений при наплавке алюминиевой бронзы на углеродистые стали // Там же. — 1971. — № 8. — С. 52–55.
5. *Шутов А. С.* Об оптимальном составе металла шва при сварке плавлением меди с малоуглеродистой сталью // Там же. — 1970. — № 11. — С. 17–19.
6. *Ротач А. П.* Повышение работоспособности и долговечности сварных соединений медь–низкоуглеродистая сталь, эксплуатирующихся при высоких и изменяющихся температурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1985. — 16 с.
7. *Павлюк С. К., Ротач А. П., Вечер А. В.* Свойства металла сварных швов соединений медь–низкоуглеродистая сталь при повышенных температурах и их сопротивление термической усталости // Пробл. прочности. — 1986. — № 3. — С. 15–19.
8. *Колета В. Н., Илюшенко В. М.* Оптимизация параметров дополнительной газовой защиты при сварке и наплавке меди и ее сплавов под флюсом // Автомат. сварка. — 2010. — № 11. — С. 47–49.
9. *Рафинирование металла при плавке меди и ее сплавов из отходов* / В. Н. Колета, В. М. Илюшенко, Ф. К. Биктагиров и др. // Современ. электрометаллургия. — 2011. — № 1. — С. 33–37.
10. *Колета В. Н., Илюшенко В. М.* Плавлено-агломерированный флюс для сварки и наплавки меди и ее сплавов // V Междунар. конф. «Сварочные материалы. Технологии. Производство. Качество. Конкурентоспособность». — (Киев, май 2010 г.). — Киев, 2010. — С. 117–123.

The paper gives the results of investigation of the influence of a number of techniques on iron content in weld metal in copper–steel joints in submerged-arc welding. A new process was developed for welding copper to steel by a split electrode, consisting of wires of different diameter that allows controlling heat input into the copper and steel edges, simplifying the process of electrode following the butt, and producing welds of the required quality.

Поступила в редакцию 05.01.2012