

УДК 621.791.753.042

Щетинин С.В.*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СВАРОЧНОГО ТОКА И СКОРОСТИ СВАРКИ НА ДУГУ И ФОРМИРОВАНИЕ ШВОВ

Установлены закономерности воздействия магнитного поля сварочного тока и скорости сварки на дугу. Разработаны электромагнитная теория образования подрезов и способ односторонней высокоскоростной сварки, обеспечивающий качественное формирование швов за счет регулирования магнитного поля.

Интенсификация производства труб для газо- и нефтепроводных магистралей приводит к необходимости повышения производительности процесса односторонней сварки, увеличение которой ограничено нарушением формирования сварных швов вследствие протекнов жидкого металла и неравномерного формирования обратного валика.

Для улучшения обратного формирования целесообразно производить одностороннюю высокоскоростную сварку, что приводит к образованию подрезов [1], которые объясняют перегревом жидкого металла [2], увеличением скорости охлаждения [3] и поверхностного натяжения [4, 5], отклонением дуги в хвостовую часть ванны [6], увеличением давления дуги [1, 7], нарушением равновесия металла [1] и движением жидкого металла в ванне [8].

Большой вклад в развитие процесса сварки труб, исследование и использование магнитного поля сварочного тока при многодуговых процессах внесли Б.Е. Патон, В.К. Лебедев и С.Л. Мандельберг [1, 9]. Однако воздействие магнитного поля сварочного тока и скорости сварки на дугу и формирование швов при односторонней однодуговой сварке изучено недостаточно [10], механизм образования подрезов полностью не установлен.

Разработка энерго- и материалосберегающих процессов односторонней высокоскоростной сварки является важной научно-технической проблемой.

Задачей данных исследований является изучение механизма образования подрезов и разработка способа односторонней высокоскоростной сварки, обеспечивающей качественное формирование швов за счет регулирования магнитного поля сварочного тока.

Формирование швов при односторонней сварке определяется давлением дуги и электромагнитными силами, действующими на дугу и жидкий металл ванны. Давление дуги – результат пинч-эффекта, поэтому формирование швов определяется электромагнитным полем сварочного тока, которое одновременно действует на дугу и жидкий металл ванны.

Для изучения механизма образования подрезов производили скоростную киносъемку со скоростью 1500 кадров в секунду дуги и жидкого металла одновременно в реальных условиях процесса наплавки составным электродом [11] в аргоне на прямой полярности на режиме: величина тока 2300 – 2400 А, напряжение на дуге 23 – 24 В, скорость $(2,8 – 3,9) \cdot 10^{-2}$ м/с. Пределы скорости наплавки выбраны с учетом перехода от качественного формирования валика к образованию подрезов. Для защиты дуги и жидкого металла использовано удлиненное медное сопло, выполненное по форме сварочной ванны, так как в открытой атмосфере подрезы не образуются ни при повышении скорости сварки до $6,9 \cdot 10^{-2}$ м/с, ни при изменении направления магнитного поля сварочного тока (рис. 1), вследствие того, что дуга работает как насос, всасывая из атмосферы и выбрасывая в сторону основного металла газ, что подтверждают свищи в шве. За электродом движется отраженный мощный вертикальный газовый поток, который препятствует направленному движению жидкого металла по оси в хвостовую часть ванны. Жидкий металл движется к кромкам ванны, обеспечивая формирование швов без подрезов. Экспериментальные данные являются средними из статистической обработки не менее 3000 кадров, что соответствует $(5 – 7) \cdot 10^{-2}$ м шва.

*ПГТУ, канд. техн. наук

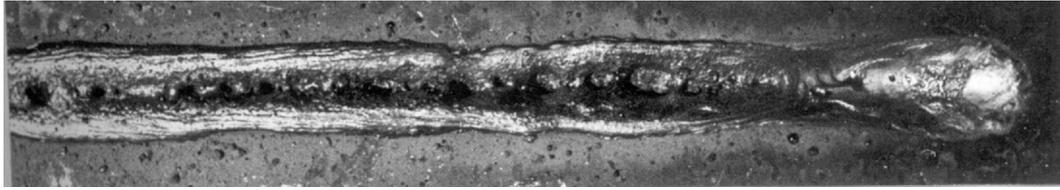


Рис. 1 – Формирование сварного шва при высокоскоростной сварке проволочным электродом в открытой атмосфере, $V = 6,9 \cdot 10^{-2}$ м/с

Как установлено при киносъемке процесса сварки составным электродом, активное пятно движется по торцу электрода в продольном и поперечном направлениях. Движение дуги в процессе сварки является результатом действия магнитного поля и происходит под действием электромагнитной силы. Определяющая роль магнитного поля в движении активного пятна по торцу электрода подтверждается зависимостью скорости движения дуги от направления поля и скорости сварки. Скорость движения активного пятна с увеличением скорости сварки возрастает вследствие уменьшения индукции магнитного поля позади дуги и движения дуги в сторону меньшей напряженности поля. При сварке от токоподвода вследствие направленной вперед электромагнитной силы скорость движения активного пятна, значительно ниже, чем при сварке на токоподвод. При повышении скорости сварки на токоподвод направленная назад электромагнитная сила возрастает, что приводит к увеличению скорости движения дуги, измеренной по кинограммам, в квадратичной зависимости.

Более значительное увеличение скорости движения дуги по сравнению со скоростью сварки приводит к усиленному охлаждению активных пятен и столба. С увеличением скорости движения дуги усиливается охлаждение внешних слоев столба, электрическая проводимость которых резко падает, и электрический ток начинает протекать в более узком канале [12]. При уменьшении размера активного пятна увеличивается индукция магнитного поля сварочного тока и в квадратичной зависимости магнитное давление $P_M = \frac{B^2}{2\mu}$ [13], под действием которого

за счет пинч-эффекта размер активного пятна уменьшается в квадратичной зависимости.

По данным Фрума, полученным путем фотографирования катодного пятна с помощью быстродействующего оптического затвора Керра, позволяющим с короткой экспозицией делать одиночные или серийные снимки с малым интервалом от 0,4 до 70 мкс, размер перемещающегося катодного пятна 10^{-5} м [14]. Поэтому при киносъемке фиксируется размер площади, по которой перемещается катод, характеризующей диаметр дуги, измеренный по кинограммам по размеру светящейся области электрода (рис. 2). Г.И. Лесков [15] считает, что при одном методе измерения возможно использование сравнительных данных о размерах дуги.

Развитая поверхность составного электрода, длина которого $(20 - 21) \cdot 10^{-3}$ м, позволяет измерить диаметр дуги. Как установлено по кинограммам процесса сварки составным электродом (рис. 2), при повышении скорости сварки и движения дуги по торцу электрода диаметр дуги, значения которого хорошо согласуются с данными диаметра активного пятна, полученными при измерении распределения давления сварочной дуги, уменьшается, вследствие чего плотность тока возрастает (рис. 3, 4). В результате увеличивается направленная вниз на кромках ванны электромагнитная сила $F_{ЭМ} = JB$ [12], которая определяется плотностью тока J и индукцией поля B , что приводит к стеканию жидкого металла с кромок и образованию подрезов. Средняя плотность тока при формировании швов без подрезов $(1,57 - 1,98) \cdot 10^7$ А/м² хорошо согласуется с данными Г.И. Лескова $(1,6 - 2,0) \cdot 10^7$ А/м² [14], что подтверждает достоверность экспериментальных данных.

Вследствие значительного увеличения скорости движения дуги при повышении скорости сварки зависимость диаметра от скорости движения дуги более значительна, чем от скорости сварки (рис. 3, 4). При сварке на токоподвод, когда дуга движется, в основном, под действием электромагнитной силы, зависимость диаметра столба от скорости движения дуги V_D и величины тока I имеет вид (рис. 4):

$$d = 4,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{I}{V_D}}, \text{ м.} \quad (1)$$

Увеличение скорости движения и уменьшение диаметра дуги, которое подтверждается сужением шва, приводит к концентрации и уменьшению тепловложения в боковые кромки ванны.



Рис. 2 – Кинограмма процесса сварки составным электродом в аргоне: Интервал между кадрами $6 \cdot 10^{-4}$ с, Направление сварки – слева направо

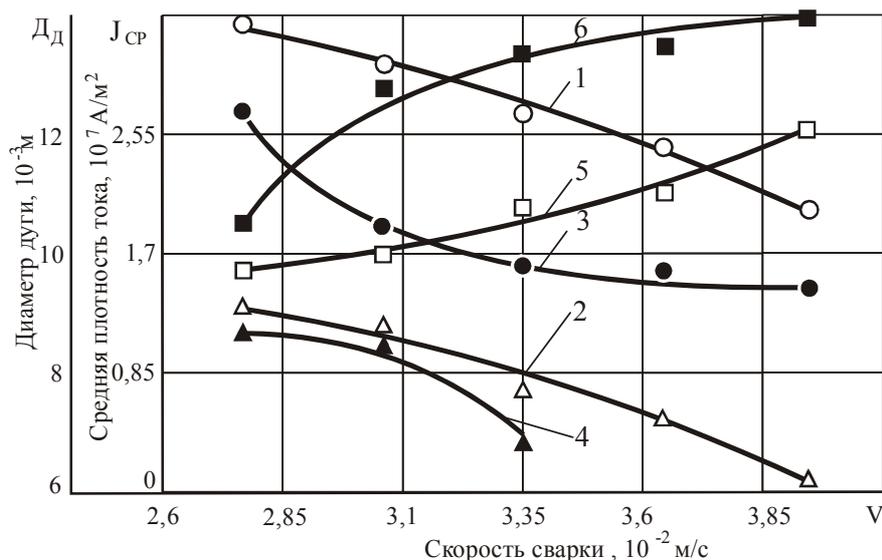


Рис. 3 – Зависимость диаметра дуги (1, 2, 3, 4) и плотности тока (5, 6) от магнитного поля и скорости сварки от токоподвода (1, 3, 5) и на токоподвод (2, 4, 6): 1, 3, 5, 6 – дуга в области проволоки; 2, 4 – дуга в области кромок ленты

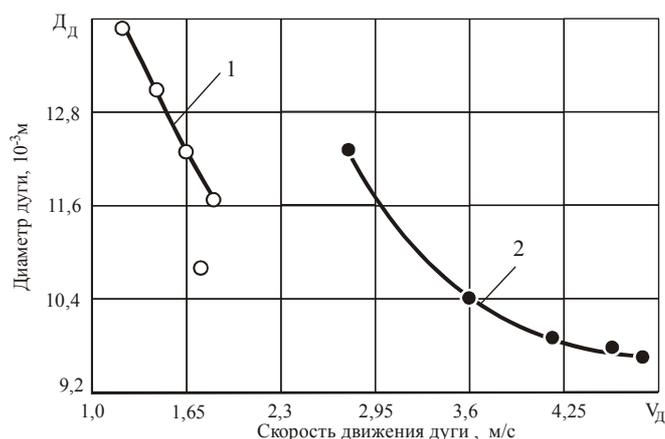


Рис. 4 – Зависимость диаметра дуги от скорости движения дуги при сварке от токоподвода (1) и на токоподвод (2)

Из установленных закономерностей следует, что наиболее вероятна электромагнитная природа образования подрезов, согласно которой при высокоскоростной сварке под действием магнитного поля концентрируется дуга, уменьшается тепловложение в боковые кромки ванны, электрическое сопротивление которых снижается. В результате возрастает величина тока, протекающего через боковые кромки, индукция и магнитное давление, под действием которого жидкий металл стекает с кромок ванны, что приводит к образованию подрезов.

При сварке составным электродом [11] вследствие движения дуги в продольном и поперечном направлениях увеличивается диаметр дуги и тепловложение в боковые кромки ванны, электрическое сопротивление которых возрастает. В результате уменьшается величина тока, протекающего через боковые кромки, индукция и направленная вниз электромагнитная сила, что предотвращает стекание металла с кромок ванны и образование подрезов. Вследствие увеличения диаметра давление дуги $P_D = \mu \frac{I^2}{\pi r_a^2}$ уменьшается, и формирование швов улучшается.

Односторонняя высокоскоростная сварка в результате уменьшения давления дуги, увеличения скорости движения жидкого металла и снижения гидродинамического давления обеспечивает качественное формирование швов на флюсовой подушке с флюсом мелкой грануляции ОСЦ-45М или АН-348АМ, который используется и для сварки с внешней стороны.

Установленные закономерности воздействия магнитного поля сварочного тока и скорости сварки на дугу и разработанный способ односторонней высокоскоростной сварки составным электродом могут быть использованы при сварке котлов железнодорожных цистерн.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволяют разработать новые энерго- и материалосберегающие процессы односторонней высокоскоростной сварки.

Выводы

1. Установлена электромагнитная природа воздействия магнитного поля и скорости сварки на диаметр дуги. С повышением скорости сварки и движения дуги вследствие усиленного охлаждения увеличивается индукция и в квадратичной зависимости магнитное давление, под действием которого диаметр дуги уменьшается, плотность тока возрастает, что приводит к концентрации и уменьшению тепловложения в боковые кромки ванны.
2. На основании киносъемки процесса сварки разработана электромагнитная теория образования подрезов. Магнитное поле при сварке от токоподвода снижает скорость движения дуги, увеличивает диаметр активного пятна, уменьшает плотность тока, что обеспечивает качественное формирование швов без подрезов.
3. Разработанный энерго- и материалосберегающий процесс односторонней высокоскоростной сварки составным электродом обеспечивает движение дуги в продольном и поперечном направлениях, увеличение диаметра, уменьшение плотности тока и давления дуги, регулирование магнитного поля сварочного тока, замену двухсторонней сварки на одностороннюю и качественное формирование швов на флюсовой подушке.

Перечень ссылок

1. Патон Б.Е. Некоторые особенности формирования швов при сварке с повышенной скоростью / Б.Е. Патон, С.Л. Мандельберг, В.Г. Сидоренко // Автоматическая сварка. – 1971. – № 8. – С. 3 – 6.
2. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
3. Wealleans J.W. Undercutting and weld bead turbulence in TIG-welding / J.W. Wealleans, P. Adams // Welding and metal Fabrication. – June. – 1969. – P. 225 – 257.
4. Ando K. Studies on anode and cathode energy of Tig. Arc / K. Ando, J. Nishikawa // International Institute of Welding. Doc., 212 – 158 – 68, 1968. – 6 p.
5. Ishizaki K. Теория поверхностного натяжения при дуговой сварке. Проплавающее действие дуги / K. Ishizaki, Y. Kalibe // Есецу гаккайси. J. Japan Weld Soc. – 1966. – 35, № 2. – P. 89 – 98.
6. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги / Г.М. Тиходеев. – М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – 254 с.
7. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением / А.А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
8. Гулаков С.В. Влияние переноса тепла потоком жидкого металла на форму сварочной ванны / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Сварочное производство. – 1982. – № 10. – С. 2 – 3.
9. Патон Б.Е. Магнитогидродинамические явления при электрической сварке и их использование / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев // Новые проблемы сварочной техники. – Киев, 1964. – С. 222 – 236.
10. Мандельберг С.Л. Магнитное взаимодействие дуг при двухдуговой трехфазной сварке / С.Л. Мандельберг // Автоматическая сварка. – 1966. – № 4. – С. 30 – 36.
11. А.с. 1407719 СССР, МКИ В23К 9/00 Способ дуговой сварки / В.В. Чигарев, С.В. Щетинин.
12. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 543 с.
13. Абрамович Г.П. Прикладная газовая динамика / Г.П. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
14. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М.: Наука, 1968. – 343 с.
15. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 334 с.

Рецензент: А.Д. Размышляев
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 20.03.2008