



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

В. В. ЧИГАРЕВ, д-р техн. наук, **С. В. ЩЕТИНИН**, инж. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Экспериментально установлено, что с расчетом скорости сварки возрастает индукция электромагнитного поля в зоне сплавления. При этом увеличиваются направленные вниз электромагнитная сила и магнитное давление, влияющие на образование подрезов.

Ключевые слова: дуговая сварка, электромагнитные силы, давление дуги, составной электрод, активное пятно, формирование шва

Давление сварочной дуги и электромагнитные силы сварочного тока, направленные вниз в значительной степени определяют формирование швов при односторонней сварке на флюсовой подушке. В работе [1] установлено, что давление дуги является результатом пинч-эффекта, т.е. сжатия плазмы собственным магнитным полем дуги. Большой вклад в теоретическое рассмотрение основных видов силового воздействия сварочной дуги, исходя из его электромагнитной природы, внесли В.К.Лебедев и И. В. Пентегов [2, 3].

В литературе давлением дуги часто называют ее силовое воздействие на всю поверхность ванны, что, по справедливому замечанию А. А. Ерохина [4], нельзя признать удачным, так как оно имеет размерность силы, а не давления. Поэтому наиболее детально разработанные методики измерения силового воздействия весовым методом [5–8] не пригодны для измерения давления дуги. Существующие методики измерения распределения давления дуги разработаны только для сварки неплавящимся электродом неподвижной или перемещающейся с постоянной скоростью дугой [9–11].

При односторонней сварке на флюсовой подушке на жидкий металл сварочной ванны действуют направленные вниз силы давления дуги P_d , электромагнитная сила $P_{эм}$ (рис. 1), сила гидродинамического давления жидкого металла $P_г$, а также направленные вверх силы поверхностного натяжения $P_{п.н}$ и давления флюсовой подушки $P_{ф.п.}$. При этом

$$P_d + P_{эм} + P_г = P_{п.н} + P_{ф.п.} \quad (1)$$

Давление дуги и действующие на жидкий металл ванны электромагнитные силы определяют формирование швов при односторонней сварке.

Для измерения распределения давления в реальных условиях перемещающейся дуги, горячей на плавящемся электроде под флюсом, разработана специальная методика (рис. 2), заключающаяся в следующем. Предварительно установленный по оси шва зонд 3 при приближении электрода 1 перемещается под действием дуги по вертикали. Линейные перемещения зонда преобразуются электронно-механическим преобразователем 6 в пропорциональный электрический сигнал постоянного тока, который усиливается усилителем 7 и фиксируется осциллографом 8. Измерение линейных перемеще-

ний зонда, пропорциональных давлению дуги, дает кривую распределения давления по активному пятну. В качестве зонда используется стержень из кварцевого стекла, характеризующегося низкой теплопроводностью — в 400 раз меньше теплопроводности меди и минимальным коэффициентом линейного расширения $5,5 \cdot 10^{-7}$. Температура размягчения кварца 2023 К, но в результате малой теплопроводности и перемещения под действием давления дуги он остается в твердом состоянии более длительное время, чем тантал. Для снижения вероятности размягчения диаметр кварцевого стержня принят равным $1,1 \cdot 10^{-3}$ м. Зонд вводится в просверленное с обратной стороны отверстие на глубину, обеспечивающую измерение давления сварочной дуги в области столба, непосредственно прилегающей к активному пятну

$$l = (S - h_{пр} + S_{пр} + 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (2)$$

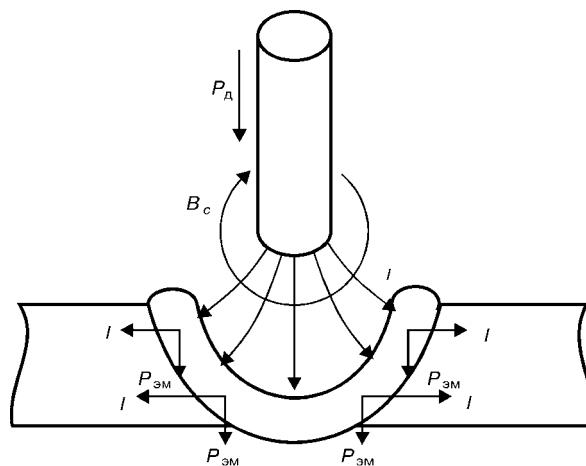


Рис. 1. Электромагнитное давление в зоне сплавления

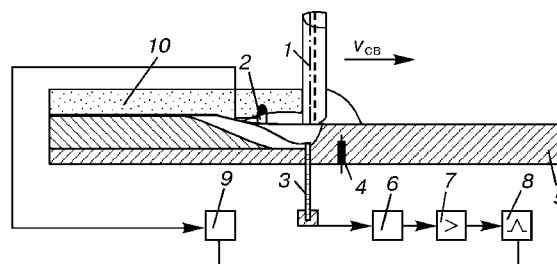


Рис. 2. Схема измерения распределения давления дуги при сварке под флюсом: 1 — составной электрод; 2 — фотоэлемент; 3 — кварцевый стержень; 4 — тантал; 5 — металлическая пластина; 6 — электронно-механический преобразователь; 7 — усилитель; 8 — осциллограф; 9 — блок фотоэлемента; 10 — флюс



где S — толщина пластины; $h_{пр}$ — глубина проплавления; $S_{пр}$ — толщина жидкой прослойки.

Эта область для каждого режима определяется в предварительных опытах путем измерения глубины проплавления и толщины жидкой прослойки. Учет второго параметра необходим, так как быстро движущийся жидкий металл согласно закону Бернулли резко снижает давление. Поэтому при попадании зонда в жидкую прослойку давление резко снижается. Область, в которой измерялось давление, уточнялась по макрошлифам. При расположении зонда в этой области и стабильном режиме сварки экспериментальные данные характеризуются хорошей повторяемостью.

Давление дуги измеряли на установке, представляющей собой сварочный стенд с датчиком, положение которого по вертикали регулируется механизмом перемещения. В гнездо датчика, находящегося в крайнем нижнем положении, устанавливали кварцевый стержень длиной $5 \cdot 10^{-2}$ м, длина которого выбиралась с учетом обеспечения минимального теплового воздействия дуги и нагретой пластины на показания датчика, дополнительно изолированного асбестом. Пластина с высверленным на определенную глубину отверстием для кварцевого стержня и зачеканенной пластинкой тантала размером $(1 \times 1) \cdot 10^{-3}$ м устанавливалась на сварочный стенд с фиксируемыми штырями, обеспечивающими соосное расположение отверстия и зонда, и жестко крепилась к нему. Кварцевый стержень вводили в отверстие пластины и перемещали датчик вверх до соприкосновения зонда с пластиной. Этот момент фиксировался на осциллографе по отклонению луча гальванометра.

Для уменьшения трения и исключения протекания жидкого металла отверстие, в котором помещался зонд, было выполнено переходным — диаметром $3 \cdot 10^{-3}$ м на входе и $1,3 \cdot 10^{-3}$ м в зоне сплавления.

В качестве датчика использовался электронно-механический преобразователь, предназначенный для непрерывного преобразования углового и линейного перемещений в пропорциональный сигнал постоянного тока.

С включением электрической схемы измерения давления дуги в сеть подается питание на фотодатчик и электронно-механический преобразователь. При проведении сварки на подготовленной пластине вся схема находится в исходном состоянии до тех пор, пока дуга не достигнет установленного в плоскости зонда фотодатчика, который срабатывает под действием светового потока сварочной дуги. После чего замыкается цепь и срабатывает реле, которое замыкает свои нормально разомкнутые

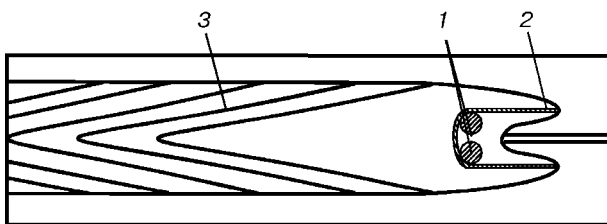


Рис. 3. Схема сварки составным электродом: 1 — проволочные электроды; 2 — ленточный электрод; 3 — сварной шов

контакты и включает съемку осциллографа. Двигатель протяжки осциллографической бумаги включен постоянно, поэтому при перемещении дуги и зонда давление фиксируется полностью. Когда дуга в результате перемещения прекращает действовать на фотодатчик, цепь его размыкается, отключается реле, которое размыкает свои контакты и отключает съемку осциллографа. Электрическая схема позволяет записать распределение давления сварочной дуги на осциллограмме с погрешностью преобразования, равной 0,5 % при нормальной температуре (293 ± 3 К).

Давление сварочной дуги определяется площадью, по которой под действием электромагнитного и теплового полей в соответствии с принципом минимума Штеенбека перемещается активное пятно по торцу электрода. В зависимости от формы электрода дуга перемещается по концентрированной поверхности при сварке проволочным электродом, вдоль сварочной ванны при сварке продольной лентой и поперек ванны при наплавке перпендикулярной лентой. Поэтому наиболее эффективно регулировать давление сварочной дуги, изменяя форму электрода.

Влияние формы электрода на распределение давления дуги определяли при наплавке током обратной полярности на пластины размером $0,016 \times 0,25 \times 0,6$ м, обеспечивающие минимальные деформации и исключающие их влияние на показания датчика. В качестве источника питания использовали выпрямитель ВМГ-5000. Наплавку производили на режиме $I = 2100$ А; $U = 32$ В; $v = 3,8 \cdot 10^{-2}$ м/с, отработавшем для сварки составным электродом.

Обработку экспериментальных данных распределения давления дуги проводили методом математической статистики при количестве измерений не менее пяти. Осциллограммы распределения давления при неточном расположении зонда в дуге или попадании в жидкую прослойку считались недействительными. Кроме того, резко отличающиеся по значению данные были проверены, не являются ли они промахом, а не следствием статистического разброса.

Особенно существенное влияние оказывает давление дуги на формирование швов при односторонней сварке, когда оно приводит к вытеканию жидкого металла из сварочной ванны. Давление дуги (Па) распределяется по закону Гаусса с максимумом значения, определяемого по формуле из [1]

$$P_{\max} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r^2}, \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Наиболее эффективно уменьшается давление дуги при увеличении размера активного пятна за счет изменения формы электрода.

Для улучшения формирования швов при односторонней сварке за счет регулирования давления дуги разработан способ односторонней сварки составным электродом [12, 13], состоящим из двух



проволок и охватывающей их U-образной ленты, прямолинейные участки которой располагаются впереди проволоки по направлению сварки (рис. 3). При этом проволочные электроды располагаются симметрично на расстоянии 0,5...0,6 диаметра проволоки от стыкуемых кромок.

При сварке составным электродом вследствие смещения проволочных электродов с оси стыка на кромки основного металла максимальное давление дуги располагается над основным металлом.

В процессе сварки дуга перемещается по торцу составного электрода в продольном и поперечном направлениях относительно направления сварки. В результате площадь, по которой перемещается активное пятно, возрастает, и давление дуги уменьшается. Кроме того, смещение относительно зазора и расположение проволочных электродов над основным металлом значительно уменьшает давление дуги в области зазора, так как максимальное давление совпадает с осью электрода и в соответствии с законом Гаусса [1] резко падает при удалении от него. Вследствие уменьшения направленных вниз электромагнитных сил и, собственно, давления при сварке составным электродом обеспечивается качественное формирование швов.

При горении дуги на кромках ленты она не оказывает давления на оси ванны, так как смещена с оси и характеризуется низкой проплавляющей способностью. Это хорошо согласуется с воздействием составного электрода на глубину проплавления и подтверждает основную роль давления дуги в проплавлении и формировании обратного валика при односторонней сварке. При сварке составным электродом давление определяется воздействием дуги, перемещающейся по торцу проволоки и прилегающим изогнутым и прямолинейным участкам ленты. Поэтому при сварке составным электродом увеличивается размер активного пятна и уменьшается давление дуги более чем в 3 раза по сравнению со сваркой проволочным электродом. Это обеспечивает качественное формирование обратного валика при односторонней сварке на флюсовой подушке с использованием стандартного стекловидного флюса АН-348АМ или ОСЦ-45М.

Дуга, горящая на прилегающих к проволокам прямолинейных участках ленты, увеличивает размер передней части активного пятна. Она отклоняется вперед, в результате чего максимум давления смещается в заднюю часть активного пятна. Давление дуги становится асимметричным с максимумом, расположенным на расстоянии 0,6 условного диаметра катодного пятна.

В области зазора давление

$$P(r) = P_{\max} e^{-ar^2}, \quad (4)$$

где P_{\max} — максимальное давление, Па; a — коэффициент контрагирования активного пятна, м^{-2} ; r — расстояние от оси проволочного электрода, м.

Размер активного пятна возрастает также вследствие непосредственного контакта проволоки с прямолинейными участками ленты. Дуга, горящая на прямолинейных участках ленты, подогревает и расплавляет основной металл перед дугой, горя-

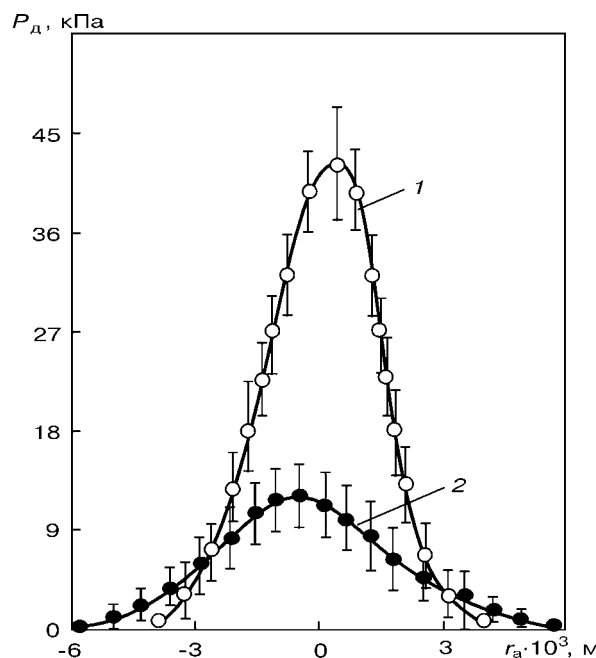


Рис. 4. Влияние формы электрода на распределение давления сварочной дуги: 1 — проволочный электрод диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м; 2 — составной электрод: проволока диаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м и лента $0,5 \times 45 \cdot 10^{-3}$ м

щей на проволочных электродах. В результате при сварке составным электродом улучшаются условия существования и увеличивается размер активного пятна дуги. Одновременное смещение максимального давления дуги с оси зазора стыка и увеличение размера активного пятна обеспечивают снижение максимального давления дуги на оси при сварке составным электродом по сравнению со сваркой проволочным электродом с 42 до 12 кПа (рис. 4).

Распределение плотности тока в активном пятне сварочной дуги близко к нормальному [1], поэтому при определении максимального давления необходимо учитывать, что плотность тока максимальна в центре и быстро убывает с увеличением расстояния от центра

$$j(r) = j_{\max} e^{-ar^2}, \quad (5)$$

где j_{\max} — максимальная плотность тока.

Максимальную плотность тока можно определить из зависимости между током и параметром нормального распределения:

$$I = 2\pi j_{\max} \int_a^{\infty} e^{-ar^2} r dr = \frac{\pi j_{\max}}{a}, \quad (6)$$

$$j_{\max} = \frac{Ia}{\pi}.$$

Подставив эту зависимость в формулу для максимального давления

$$P_{\max} = \frac{\mu I j_{\max}}{4\pi}, \quad (7)$$

получим значение P_{\max} для сварочных дуг с нормальным законом распределения плотности тока



$$P_{\max} = \frac{\mu I^2 a}{4\pi^2} \text{ Па.} \quad (8)$$

Из этого выражения следует, что при одинаковом значении тока максимальное давление определяется коэффициентом контрагирования дуги. Его уменьшение при сварке составным электродом приводит к соответствующему снижению максимального давления по сравнению с проволочным электродом. Коэффициент контрагирования находили как среднее значение a_1 и a_2 с учетом доли каждого в общем давлении дуги. Значения a_1 и a_2 определяли по осциллограммам распределения давления на каждой ветви методом математической статистики. Расчет максимального давления обеспечивает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными. Дуга несколько отклонена от вертикали, поэтому экспериментальные данные ниже расчетных.

Расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются с ранее полученными в работах [2, 3]. Вследствие уменьшения давления дуги более чем в 3 раза при сварке составным электродом обеспечивается качественное формирование обратного валика при односторонней сварке на флюсовой подушке независимо от зазора в стыке. Это очень существенно при сварке труб, длина которых равна или более 6 м и зазор в стыке изменяется от 0 до $5 \cdot 10^{-3}$ м.

Дополнительным фактором, улучшающим формирование обратного валика при односторонней сварке, является увеличение скорости движения жидкого металла в ванне. Как установлено в процессе измерения давления дуги, при попадании зонда в жидкую прослойку давление резко падает в соответствии с законом Бернулли. Это подтверждает положительное влияние повышения скорости сварки на формирование обратного валика при односторонней сварке.

Выводы

1. Показано, что эффективным способом улучшения формирования сварных швов при односторонней сварке на флюсовой подушке является умень-

шение направленных вниз электромагнитных сил и давления дуги.

2. Согласно теоретическим предпосылкам регулирования давления дуги разработан способ односторонней сварки составным электродом, состоящим из двух смещенных относительно оси стыка проволок и U-образной ленты, прямолинейные участки которой располагаются впереди проволок по направлению сварки.

3. На основании исследований распределения давления дуги установлено, что при сварке составным электродом за счет смещения проволок с оси стыка и увеличения размера активного пятна давление дуги снижается по сравнению со сваркой проволочным электродом с 42 до 12 кПа, что обеспечивает качественное равномерное по высоте формирование сварных швов при односторонней сварке на флюсовой подушке.

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 369 с.
2. Лебедев В. К., Пейтегов И. В. Силовое воздействие сварочной дуги // Автомат. сварка. — 1981. — № 1. — С. 7–15.
3. Пейтегов И. В. Силовое воздействие сварочной дуги (неканальная модель) // Там же. — 1987. — № 1. — С. 23–27.
4. Ерохин А. А. Определение величины силового воздействия дуги на расплавленный металл // Там же. — 1977. — № 11. — С. 62–64.
5. Петров А. В. Давление дуги на сварочную ванну в среде защитного газа // Там же. — 1955. — № 4. — С. 84–89.
6. Ерохин А. А. Силовое воздействие импульсной дуги на свариваемый металл // Там же. — 1976. — № 5. — С. 6–7.
7. Петруничев В. А. Тепловое и механическое воздействие дуги большой мощности на сварочную ванну // Процессы плавления основного металла при сварке. — М.: Изд-во АН УССР, 1960. — С. 117–166.
8. Шиганов Н. В., Раймонд Э. Д. Измерение давления дуги при сварке в среде аргона и под флюсом // Свароч. пр-во. — 1967. — № 12. — С. 13–17.
9. Шюек П. А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона // Современные проблемы теплообмена. — М.: Энергия, 1966. — С. 110–139.
10. Ерохин А. А., Букаров В. А., Ищенко Ю. С. Влияние геометрии вольфрамового электрода на некоторые характеристики сварочной дуги и проплавление металла // Свароч. пр-во. — 1971. — № 12. — С. 17–19.
11. Степанов В. В., Нечаев В. И. О давлении плазменной дуги // Там же. — 1974. — № 11. — С. 4–5.

It has been experimentally established that the electromagnetic field induction in the fusion zone grows with welding speed. This results in an increase of the electromagnetic force and magnetic pressure, directed downwards, that influence undercut formation.

Поступила в редакцию 05.04.2001