

УДК 621.791.927.5:669.018.25

Цветков А. И., Свиридов А. В., Титаренко К. Э.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СВАРКИ МЕДИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Эксплуатационная стойкость сварных соединений таких конструкций, как кристаллизаторы электрошлакового переплава, мартеновские и доменные фурмы, определяется как их высоким качеством, так и теплофизическими свойствами металла шва. В работе [1–3] приведена расчетная схема, позволяющая определить характер изменения рабочей температуры в зоне сварного соединения с разнородными теплофизическими свойствами. На температурный режим таких сварных соединений будут оказывать влияние и геометрические размеры шва.

Целью данной работы является разработка расчетной схемы, позволяющей оптимизировать параметры режима сварки, которая обеспечивает получение сварных швов с минимально возможной площадью проплавления и максимально возможным коэффициентом формы шва.

В качестве отправной точки для расчета режима можно воспользоваться рекомендациями работы [2], обработка данных которой дает следующую зависимость:

$$F_{\text{шп}} = 0,000012 + 0,0012\delta + 1,57\delta^2. \quad (1)$$

Обозначение параметров шва, использованных при расчете, приведены на рис. 1.

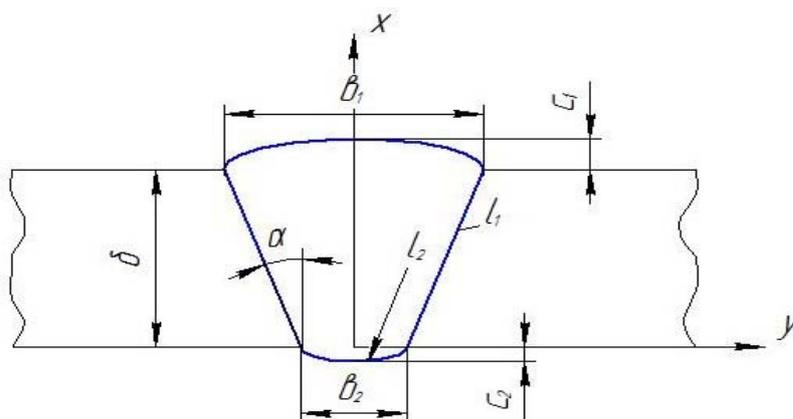


Рис. 1. Схема обозначения параметров шва, использованных при расчете режимов сварки

Исходя из требуемого содержания в металле шва $[Fe]_{\text{ш}}$, определим доленое участие основного металла γ :

$$[Fe]_{\text{шп}} = K_n(1 - \gamma)[Fe]_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент перехода железа, (0,85);

$[Fe]_{\text{пр}}$ – содержание железа в проволоке.

$$[Fe]_{\text{пр}} = \frac{[Fe]_{\text{об}}(1 - K_3) + [Fe]_{\text{к}} \cdot K_3}{1 - K_3 \cdot Q_{\text{г.ш}}/100}, \quad (3)$$

где $[Fe]_{\text{об}}$ – содержание железа в оболочке;

$[Fe]_{\text{к}}$ – содержание железа в компонентах шихты;

$Q_{\text{г.ш}}$ – количество шлакообразующей, (24 %);

K_3 – коэффициент заполнения, (0,31).

Поскольку в состав шихты входят только два ферросплава, содержащие железо (FeMn и FeTi), то расчет дает следующее содержание железа в проволоке:

$$[Fe]_{\text{пр}} = \frac{1(1-0,31)+0,82 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31}{1-0,31 \cdot 0,24} = 0,75.$$

Решая уравнение (2) относительно γ , находим:

$$\gamma = 1 - \frac{[Fe]_{\text{ш}}}{K_n \cdot [Fe]_{\text{пр}}}. \quad (4)$$

Приняв $[Fe]_{\text{ш}} = 35 \%$, получаем $\gamma = 0,46$.

Определив в соответствии с зависимостью (1) площадь шва, можно рассчитать площадь проплавления $F_{\text{пр}}$ и наплавки $F_{\text{нр}}$:

$$F_{\text{пр}} = \gamma F_{\text{ш}}, \quad (5)$$

$$F_{\text{нр}} = (1 - \gamma) F_{\text{ш}}. \quad (6)$$

Составим уравнение теплового баланса процесса проплавления:

$$q_1 + q_2 + q_3 + 2q_4 = \eta_u q_0, \quad (7)$$

где q_1 – количество тепла, расходуемого на образование зоны проплавления, Вт;

q_2 – количество тепла, идущего на перегрев расплавленного металла основного металла, Вт;

q_3 – количество тепла, теряемого на теплоотвод в медную водоохлаждаемую подкладку, формирующую обратную сторону шва, Вт;

q_4 – количество тепла, теряемого в основном металле за счет теплопроводности, Вт;

q_0 – общая тепловая мощность дуги, Вт;

η – эффективный КПД нагрева изделия дугой.

Численное значение η_u определялось экспериментально по методике [3] и составляет 0,69–0,71.

Составляющие уравнения теплового баланса q_1 и q_2 могут быть рассчитаны по известным формулам [4]:

$$q_1 + q_2 = [C_{\text{ср}}(t_{\text{пл}} - t_0) + L_{\text{пл}} + C_{\text{ж}} \Delta t] \cdot F_{\text{пр}} \cdot S_1 \cdot V_{\text{св}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{пл}}$ – температура плавления меди, (1083 °С);

t_0 – начальная температура свариваемого изделия, °С;

$C_{\text{ср}}$ – средняя удельная теплоемкость меди в интервале температур $t_0 - t_{\text{пл}}$, 0,412 А кДж/(кг·°С);

$L_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления меди, 213,52 кДж/кг;

$C_{\text{ж}}$ – теплоемкость жидкой меди, 0,4346 кДж/(кг·°С);

Δt – перегрев расплавленного металла, °С.

В соответствии с данными работы [5] перегрев над точкой плавления может составлять в общем случае 100–585 °С, а при сварке порошковой проволокой стали – 260 °С. Учитывая температуру плавления образующегося сплава (~ 1430 °С по диаграмме состояния при содержании железа 35 %), принимаем $\Delta t \approx 500$ °С.

ρ_1 – плотность меди, 8900 кг/м³;

$V_{\text{св}}$ – скорость сварки, м/с.

Составляющую уравнения теплового баланса q_3 можно рассчитать в соответствии с рекомендациями работы [6], если провести аналогию между теплоотдачей в медную водоохлаждаемую прокладку при сварке и теплоотдачей в стенку медного кристаллизатора в установках непрерывной разливки стали при турбулентном течении металла:

$$q_3 = \alpha_{\text{ж}}(t_{\text{пл}} + \Delta t - t_{\text{п}}) l_2 \cdot V_{\text{св}} \cdot \tau, \quad (9)$$

где $l_2, V_{св}$ – площадь теплоотдающей поверхности при $\tau = 1$ с;
 $t_{п}$ – температура медной подкладки, принимаем 33 °С;
 $\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи от жидкого металла шва к подкладке, Вт/(м²·°С);
 τ – время сварки, с.

Обработка данных, приведенных в работе [6], позволяет установить зависимость, связывающую величину $\alpha_{ж}$ со скоростью циркуляционного потока жидкого металла в приграничном слое, которую в первом приближении можно принять равной скорости сварки:

$$\alpha_{ж} = 820,61 + 284702V_{св} - 393592V_{св}^2. \quad (10)$$

Длину дуги l_2 можно рассчитать, воспользовавшись имеющимися параметрами шва (рис. 1):

$$l_2 = \pi \frac{b_2^2 + 4c_2^2}{4c_2} \arcsin \frac{4c_2 b_2}{b_2^2 + 4c_2^2}. \quad (11)$$

Количество тепла q_4 , теряемого в основном металле за счет теплопроводности, можно определить, если воспользоваться законом теплопроводности Фурье [7]. В соответствии с этим законом можно записать, что:

$$q_4 = \lambda l_1 V_{св} \tau - \left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right)_{ср}, \quad (12)$$

где $\left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right)_{ср}$ – средний градиент температуры в наплавлении оси y , который можно определить следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right)_{ср} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \frac{dt}{dn} \cos \alpha dx, \quad (13)$$

где $\frac{dt}{dn}$ – градиент температуры по направлению нормали к боковой поверхности сварного шва;

α – угол, образуемый нормалью к боковой поверхности шва с осью y , $\cos \alpha = \frac{\delta}{l_1}$.

Градиент температуры $\frac{dt}{dn}$ можно определить с достаточной для практики инженерных расчетов точностью, если воспользоваться формулами максимальных температур, полученных Н. Н. Рыкалиным для случая мощных быстро движущихся источников [7], с учетом соответствующих поправок, отвечающих конкретному случаю.

Для случая сварки тонких листов встык мощным быстро движущимся источником Н. Н. Рыкалин получил следующую формулу для расчета максимальной температуры:

$$t_{\max(y)} = \frac{0,484 q_0 \eta_u}{V_{св} c_{ср} \gamma \delta 2n} \left(1 - \frac{bn^2}{2a} \right), \quad (14)$$

где b – коэффициент температуротдачи;

a – коэффициент теплопроводности;

n – расстояние расчетной точки от оси шва при прямоугольной зоне проплавления.

Приняв максимальную температуру $t_{\max} = t_{пл}$ и пренебрегая на стадии проплавления теплоотдачей во внешнюю среду, про дифференцируем выражение (14) и получим:

$$\frac{dt}{dn} = \frac{0,484 \eta_u q_0}{V_{св} c_{ср} \gamma \delta 2n^2}. \quad (15)$$

Расстояние расчетной точки от оси шва до границы сплавления при реальной форме зоны проплавления является переменной величиной

$$n = \frac{b_2}{2} + \frac{b_1 - b_2}{2\delta} x. \quad (16)$$

С учетом зависимостей (13), (15), (16) и выражения для $\cos \alpha$ формула (12) принимает следующий вид:

$$q_4 = \lambda l_1 V_{\text{св}} \tau \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\delta}{l_1} \cdot \frac{4 \cdot 0,484 \eta_u q_0}{2 V_{\text{св}} \cdot c_{\text{сп}} \gamma \delta} \int_0^{\delta} \frac{dx}{\left(b_2 + \frac{b_1 - b_2}{\delta} x\right)}. \quad (17)$$

После интегрирования [8], подстановки пределов интегрирования и преобразования получаем:

$$q_4 = \eta_u q_0 \frac{2 \cdot 0,484 a \tau}{b_1 \cdot b_2}. \quad (18)$$

Выражение (18) получено на основании зависимостей, справедливых для мощных быстродвижущихся источников, когда расчетная схема приближается к сосредоточенным источникам. В условиях значительно отличающихся от указанных выше, рекомендуется [7] эффективность процесса проплавления дополнительно оценивать с помощью относительной глубины проплавления $\frac{H_{\text{пр}}}{b_1}$, где в данном случае $H_{\text{пр}} = \delta$. Выполненные расчеты и экспериментальная проверка полученных результатов подтверждают это положение, т. е. выражение (18) окончательно принимает вид:

$$q_4 = \eta_u q_0 \frac{2 \cdot 0,484 a \tau}{b_1 \cdot b_2} \cdot \frac{\delta}{b_1}. \quad (19)$$

Таким образом, после подстановок в выражение (7) его составляющих имеем:

$$q_1 + q_2 + q_3 = \eta_u q_0 \left(1 - \frac{4 \cdot 0,484 a \delta \tau}{b_1 \cdot b_2}\right). \quad (20)$$

Полная тепловая мощность дуги:

$$q_0 = U_{\text{д}} I_{\text{св}}$$

с учетом того, что $U_{\text{д}} = f(I)$, может быть записана следующим образом:

$$q_0 = 13,5 I_{\text{св}} + 0,044 I_{\text{св}}^2, \quad (21)$$

откуда:

$$I_{\text{св}} = \frac{\sqrt{13,5^2 + 0,176 q_0} - 13,5}{0,088}. \quad (22)$$

Таким образом, схема расчета режима сварки, в основе которого лежит получение швов требуемых размеров, следующая:

1. Задается толщиной свариваемого металла и его теплофизическими величинами.
2. В соответствии с зависимостью (1) рассчитываем площадь шва $F_{\text{шпр}}$, а, используя выражения (3), (5) и (6), – площади проплавления $F_{\text{пр}}$ и наплавки $F_{\text{нр}}$.

3. Учитывая рекомендации работы [9], влияние формы сварного шва на распределение температуры [1], а также условия формообразования шва при сварке меди, принимаем для листов толщиной 3–10 мм коэффициент формы шва $\varphi = 1,45 \div 2,5$. Минимальной толщине соответствует меньшее значение, а максимальной большее. В зависимости от толщины металла коэффициент формы шва можно приближенно описать следующей зависимостью:

$$\varphi = 1,0 + 150 \delta. \quad (23)$$

В этом случае расчетная ширина обратной стороны шва получается равной 7–8 мм, что значительно упрощает технологический процесс сварки.

Анализ экспериментальных данных показал, что численное значение выражения:

$$\eta_u \left(1 - \frac{1.936a\delta\tau}{b_1^2 \cdot b_2} \right), \quad (24)$$

входящее в уравнение (20) для исследованных толщин (3–10 мм), должно быть величиной постоянной и приблизительно равной 0,164.

Учитывая, что $b_2 = b_1/\varphi$ на основании выражений (23) и (24) рассчитываем ширину шва b_1 :

$$b_1 = 0,062 \sqrt[3]{\delta(1 + 150\delta)}.$$

После этого определяем b_2 , а из условий формирования обратной стороны шва принимаем $C_2 = (0,15 \div 0,25)\delta$ и рассчитываем l_2 .

4. Задаемся требуемой скорости сварки $V_{св}$ и рассчитываем $\alpha_{ж}$ и q_3 , сумму $q_1 + q_2$, используя выражения (8), (9) и (10).

5. Используя выражение (20), находим общую тепловую мощность дуги:

$$q_0 = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{\eta_u \left(1 - \frac{4 \cdot 0,484 a \delta \tau}{b_1^2 \cdot b_2} \right)} \quad (25)$$

и рассчитываем величину тока дуги по формуле (22).

6. Рассчитываем величину коэффициента наплавки α_n . Определяем реально образующую площадь наплавки:

$$F_n = \frac{\alpha_n I_{св}}{3600 \rho_2 V_{св}}, \quad (26)$$

где ρ_2 – плотность металла шва, содержащего 35 % Fe, 8300 кг/м³.

Если $F_n < F_{нр}$, это значит, что в металле шва содержится менее 35 % Fe, что обеспечивает получение требуемого комплекса физико-механических свойств сварного соединения. При $F_n > F_{нр}$ следует либо увеличить скорость сварки, в результате чего повысится эффективность процесса проплавления, либо увеличить температуру предварительного подогрева, что позволит снизить ток и уменьшить количество наплавленного металла.

7. Определяем параметры разделки кромок и зазор между ними.

Выполненные эксперименты и данные работы [2] показывают, что в диапазоне токов, рекомендованных для порошковой проволоки, можно выполнять соединения на подкладке из листов толщиной до 8–10 мм.

Величина зазора на стыке Δ_1 , способствующая получению удовлетворительного формирования шва, практически может быть определена соотношением:

$$\Delta_1 = (0,2 \div 0,3)\delta. \quad (27)$$

Подготовка кромок под сварку производится либо гильотинными ножницами, либо плазменной резкой. При обработке кромок листов этими способами получается естественный их скос, распространяющийся на всю толщину листа при фактическом отсутствии притупления ($p = 0$).

Использование естественной разделки кромок с углом $\alpha = 5 \div 10^\circ$ представляет практический интерес, т. к. устраняет дополнительные операции по разделки кромок под сварку.

После выполненных расчетов определяем реальную высоту наплавки C_1 , т. к. размеры b_2 и c_2 фиксируются размерами наплавки в формирующей подкладке:

$$C_1 = \frac{F_H - \delta(\Delta_1 + tg\alpha) - 0,67b_2c_2}{0,67b_1}, \quad (28)$$

где 0,67 – коэффициент полноты формы усиления шва.

В качестве примера рассчитываем режим сварки листов из меди толщиной 0,006 м без подогрева со скоростью 0,006 м/с.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} \delta &= 0,006 \text{ м}; & \rho_1 &= 8900 \text{ кг/м}^3; \\ a &= 0,9555 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}; & C_{\text{ср}} &= 0,4124 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}; \\ L_{\text{пл}} &= 213,52 \text{ кДж/кг}; & C_{\text{ж}} &= 0,4346 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}; \\ \rho_2 &= 8300 \text{ кг/м}^3; & \Delta t &= 500 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Ход расчета:

$$\begin{aligned} F_{\text{шр}} &= 0,757 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \text{ т. к. } \gamma = 0,45, \text{ то,} \\ F_{\text{пр}} &= 0,341 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; F_{\text{нр}} = 0,416 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Величину коэффициента формы шва φ принимаем 1,9.

Определяем размеры шва:

$$\begin{aligned} C_2 &= 0,001 \text{ м}; & b_1 &= 0,014 \text{ м}; \\ b_2 &= 0,0074 \text{ м}; & l_1 &= 0,0076 \text{ м}. \end{aligned}$$

Рассчитываем составляющие теплового баланса.

При скорости сварки $V = 0,006 \text{ м/с}$ $\alpha_{\text{ж}} = 2387,14 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$.

Тогда $q_3 = 168,72 \text{ Вт}$, $q_1 + q_2 = 1582,76 \text{ Вт}$.

ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета режима сварки, обеспечивающая получение сварных швов с оптимальными геометрическими параметрами с точки зрения воспринимаемой тепловой нагрузки. Предлагаемая методика позволяет контролировать содержание железа в металле шва, а, следовательно, и его теплофизические свойства, которые оказывают значительное влияние на работоспособность всей конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние теплопроводности металла шва на температурный режим сварного соединения / А. И. Цветков, А. Ф. Власов, А. В. Свиридов, К. Э. Титаренко // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 2(19). – С. 281–285.
2. Веселков В. Д. Сварка с двусторонним формированием шва / В. Д. Веселков, В. Н. Логутенок. – Л. : Судостроение, 1976. – 62 с.
3. Фридлянд Л. А. Скорость охлаждения металла при дуговой односторонней сварке встык / С. А. Фридлянд // Научные труды МВТУ им. Баумана. – М. : Машиз, 1948. – № 11. – С. 81–85.
4. Рабкин Д. М. Потеря фтора при наплавке автосварочных флюсов / Д. М. Рабкин // Труды по автоматической сварки под флюсом : научные труды института электросварки им. Е. О. Патона. – Киев, 1949. № 8. – С. 55–65.
5. Сварка в машиностроении : Справочник. Т. 1 / под ред. Н. А. Ольшанского. – М. : Машиностроение, 1978. – 501 с.
6. Акименко А. Д. Теплоотдача в кристаллизаторах установок непрерывной разливки стали / А. Д. Акименко, А. А. Скворцов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 10. – С. 29–36.
7. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машиз, 1951. – 296 с.
8. Двайт Г. В. Таблицы интегралов и другие математические формулы / пер. с англ. Н. В. Леви ; под ред. К. А. Семендяева. – 5-е изд. – М. : Наука, 1978. – 224 с.
9. Потапов Н. Н. Водород в наплавляемом металле при сварке под флюсом / Н. Н. Потапов, К. В. Любавский // Сварочное производство. – 1970. – № 9. – С. 4–5.