

УДК 621.791.75

Малыгина С. В., Бережная Е. В.

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГЛАВНЫХ БАЛОК КРАНОВЫХ МОСТОВ

Повышение эксплуатационной надежности и экономической эффективности металлоконструкций со сварными коробчатыми мостами во многом зависит от создания рациональных сварных узлов, новых форм конструкций и компоновки крановых мостов, а также повышения усталостной прочности за счет рационального использования специальных защитных покрытий для предупреждения основного металла от поражения брызгонесущей средой при выполнении сварки открытой дугой [1]. Причиной низкой усталостной прочности участков металла, поврежденных электродными каплями при сварке открытой дугой, являются местные внутренние напряжения, которые возникают в ограниченных объемах металла на тех участках поверхности сварного изделия, где упала капля, и резкое повышение твердости металла на этих участках в точке соприкосновения расплавленной капли с поверхностью металла изделия [2]. Высокая скорость охлаждения металла в месте падения капли вызывает повышение его твердости. В результате снижения пластичности металла при работе изделия под нагрузкой в месте падения капли образуются микротрещины [3]. Формирование углового соединения с точки зрения эксплуатации защитного покрытия отличается особо тяжелыми условиями: присутствует подсос газа в сварочную ванну; кинетическая энергия брызг, попадающих на покрытие, максимальна; соотношение площадей поперечных сечений покрытия и основного металла наибольшее [4].

Цель работы – оптимизация технологических параметров дуговой сварки в среде углекислого газа по защитным покрытиям при изготовлении балок крановых мостов.

Основным параметром режима, определяющим характер процесса сварки по защитному покрытию, является величина тока. В зависимости от характера переноса, величины разбрызгивания электродного металла и диаметра электродной проволоки  $d_э$  можно говорить о токах  $I_1 = 160 \cdot d_э^{0,875}$  и  $I_2 = 240 \cdot d_э^{0,75}$ . При токах  $I_{св} < I_1$  имеет место перенос электродного металла периодическими короткими замыканиями, при этом наблюдается небольшое разбрызгивание металла, коэффициент потерь  $у \approx 5\%$ . В диапазоне  $I_1 < I_{св} < I_2$  наблюдается крупнокапельный перенос при непрерывном горении дуги, разбрызгивание электродного металла достигает максимальной величины и  $у = 14...15\%$ . При сварочном токе  $I_{св} > I_2$  происходит измельчение капель электродного металла, снижение коэффициента потерь  $у$  до  $7\%$ . Характер переноса электродного металла и степень погружения сварочной дуги в основной металл оказывает влияние на эффективность использования тепловой мощности дуги, которая оценивается величиной эффективного КПД нагрева изделия  $h_u$ . При  $I_{св} \approx I_1$  кратер неглубок, пятно дуги мало углубляется в основной металл и  $h_u \gg 0,65$ . В диапазоне  $I_1 < I_{св} < I_2$  в связи со значительными потерями электродного металла на разбрызгивание величина эффективного КПД также невелика:  $h_u \gg 0,72$ . И только по мере увеличения сварочного тока ( $I_{св} > I_2$ ), изменения характера переноса электродного металла эффективный КПД возрастает. Кроме указанных значений сварочного тока следует говорить о минимальном  $I_{min}$ , критическом  $I_{кр}$  и максимальном  $I_{max}$  значениях тока:

$$I_{св} = j_{min} \cdot F_э; \quad I_{кр} = (75 + 47h)(1 - e^{0,82d_э}); \quad I_{max} = 350d_э,$$

где  $j_{min}$  – минимальная плотность тока для заданного диаметра электродной проволоки,  $A/mm^2$ ,  $j_{min} = 17 + 70/d_э$ ;

$F_э$  – площадь поперечного сечения электродной проволоки,  $mm^2$ .

Величина сварочного тока  $I_{кр}$  определяется необходимостью обеспечения стабильности проплавления основного металла и зависит от соотношения высоты столба жидкого металла с диаметром электрода. При  $I_{св}$   $\approx$   $I_{кр}$  наблюдаются прорывы жидкого металла под основание дуги и значительные колебания сечения шва по его длине.

Напряжение дуги  $U_{\delta}$  является функцией сварочного тока и диаметра электродной проволоки:

$$U_{\delta} = 24 - \frac{12}{d_{\delta}} + 0,37 \frac{I_{св}}{\sqrt{d_{\delta}}}.$$

В основе предлагаемой методики расчета режима сварки лежит решение уравнения теплового баланса. Для случая сварки в углекислом газе по защитному покрытию уравнение теплового баланса процесса проплавления может быть представлено следующим образом:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_u, \quad (1)$$

где  $Q_1$  – количество тепла, идущее на проплавление основного металла и образования зоны проплавления площадью  $F_{np}$ :

$$Q_1 = (S_{нл} - S_0) F_{np} r V_{св},$$

$S_{нл}$  – теплосодержание расплавленного металла;

$S_0$  – теплосодержание основного металла в начальный момент времени;

$r$  – плотность расплавленного металла;

$V_{св}$  – скорость сварки;

$Q_2$  – количество тепла, идущее на перегрев расплавленного металла выше температуры плавления:

$$Q_2 = C \Delta T F_{np} r V_{св},$$

$C$  – теплоемкость жидкого металла;

$\Delta T$  – перегрев жидкого металла над точкой плавления;

$Q_3$  – количество тепла, теряемое за счет теплопроводности в основной металл;

$Q_u$  – эффективная тепловая мощность сварочной дуги:

$$Q_u = h_u I_{св} U_{\delta}.$$

Если воспользоваться законом теплопроводности Фурье и рассчитать градиент температуры, приняв схему быстро движущегося точечного источника, можно получить формулу для расчета составляющей  $Q_3$ :

$$Q_3 = 3,4 \frac{Q_u}{r^3} \cdot L, \quad (2)$$

где  $L$  – длина линии сплавления;

$r$  – радиус-вектор, выражающий расстояние от линии сплавления до точечного источника. Поскольку при принятой схеме углового шва радиус  $r$  – величина переменная, то его можно рассчитать с некоторой погрешностью из условия равенства расчетной площади сварного шва  $F_p$  площади полуокружности:

$$r = \sqrt{\frac{2F_p}{p}} = 0,8\sqrt{F_p}.$$

Если зона проплавления основного металла ограничена параболой, то:

$$F_p = \frac{2}{3}hb = \frac{2\sqrt{2}}{3}kh = 0,94kh. \quad (3)$$

Если зона проплавления основного металла ограничена полуэллипсом, то:

$$F_p = \frac{p}{4}hb = \frac{p\sqrt{2}}{4}kh = 1,11kh. \quad (4)$$

Однако, как показали эксперименты, реальная схема процесса сварки и реальное изделие отличаются от расчетных. Поэтому формула (2) требует уточнения, исходя из опытных данных:

$$Q_3 = 3,4a_1a_2a_3Q_uL/r^2,$$

где  $a_1$  – коэффициент, учитывающий влияние параметров режима сварки на интенсивность теплоотвода от сварочной ванны в массу металла на стадии проплавления:

$$a_1 = 0,9 + 1,8e^{-(0,6+10^{-8}V_{св}Q_u^2)},$$

$a_2$  – коэффициент, учитывающий влияние толщины стенки  $\Delta$  на интенсивность теплоотвода:

$$a_2 = e^{-0,45d/\Delta},$$

$d$  – разрывный параметр;

$a_3$  – коэффициент, учитывающий отличие точечного источника от сварочной дуги:

$$a_3 = 0,07r^2.$$

Из уравнения (1) можно определить площадь проплавления  $F_{np}$  основного металла. Для случая сварки низкоуглеродистых низколегированных сталей типа 09Г2С, 10ХСНД получим следующее выражение:

$$F_{np} = \frac{Q_u - Q_3}{13,75V_{св}}. \quad (5)$$

С другой стороны расчетную площадь проплавления  $F_{np}^p$  можно определить, зная расчетную площадь сварного шва  $F_p$ , формулы (3), (4):

$$F_{np}^p = (F_p - 0,5\kappa^2)\kappa_p, \quad (6)$$

где  $\kappa_p = 1,0 \dots 1,2$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние конструктивных особенностей изделия на возможное искажение формы зоны проплавления.

Формулы (5) и (6) используются при расчете режима сварки до совпадения  $F_{np}$  и  $F_{np}^p$  с заданной точностью.

Коэффициент расплавления  $a_p$  можно определить по зависимости:

$$a_p = a_p' + \Delta a_p,$$

где  $a_p'$  – составляющая коэффициента расплавления, определяемая тепловой мощностью дуги, при сварке на обратной полярности можно положить  $a_p' \gg 12$  г/А·ч;

$\Delta a_p$  – составляющая, зависящая от тепловложения в вылет электродной проволоки проходящим по нему током.

Величина  $\Delta a_p$  определяется в зависимости от параметров режима сварки и теплофизических свойств электродной проволоки. Применительно к сварке проволокой типа Св-08 Г2С получили следующее выражение:

$$\Delta a_p = c_1 j \left( \frac{1 - e^{-0,1 \cdot c_2 L_e}}{c_2} - \frac{4,5}{c_3} \right),$$

где  $j$  – плотность тока в электродной проволоке, А/мм<sup>2</sup>;

$L_e$  – вылет электрода, мм;

$c_1 = 0,00518$ ;  $c_2 = -0,00406j$ ;  $c_3 = -0,59434$ .

Скорость подачи электродной проволоки можно определить из соотношения:

$$rV_n F_\varnothing = a_p I_{cв},$$

откуда получаем:

$$V_n = \frac{a_p \cdot I_{cв}}{7,85 \cdot F_\varnothing},$$

где  $V_n$  – скорость подачи, м/ч.

Зная коэффициент расплавления  $a_p$ , можно определить коэффициент наплавки из выражения:

$$a_n = a_p (1 - y / 100),$$

где  $y$  – коэффициент потерь электродного металла, %.

Тогда скорость сварки  $V_{cв}$  (м/ч) можно определить из выражения:

$$F_n r V_{cв} = a_n I_{cв},$$

откуда получаем:

$$V_{cв} = a_n I_{cв} / 7,85 F_n, \quad (7)$$

где  $F_n$  – площадь наплавленного металла, мм<sup>2</sup>.

Исходя из условий формирования углового шва и экспериментальных данных площадь наплавленного металла  $F_n$ , можно определить приближенно по формуле:

$$F_n = 0,5k^2 + 1,05k.$$

Если при сварке угловых швов используется покрытие для защиты поверхности от налипания брызг расплавленного металла, то рассчитанная по формуле (7) скорость сварки должна быть меньше предельной скорости:

$$V_{св} = b_0 + b_1 I_{св} - b_2 S, \quad (8)$$

где  $S = d \cdot L$ ;

$d$  – толщина слоя защитного покрытия, мм;

$L$  – протяженность слоя защитного покрытия в поперечном сечении шва, мм;

$b_0, b_1, b_2$  – коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от марки покрытия.

Для защитного покрытия [5] уравнение допустимой скорости сварки, действительное при расчетах скоростей выполнения швов с количеством защитного покрытия, достаточно близким к предельно допустимому (2,0...2,5 % площади поперечного сечения шва, составляющей 25...30 мм<sup>2</sup>), выглядит следующим образом:

$$V_{св} \leq 30,91 + 0,03953 I_{св} - 14,81 S. \quad (9)$$

При содержании в металле шва защитного покрытия в количествах, заведомо меньших 2,0...2,5 % площади поперечного сечения шва, т. е. больше 25...30 мм<sup>2</sup>, уравнения (8) и (9) теряют смысл, так как при таком количестве защитное покрытие не влияет на технологию сварки. По полученным зависимостям выполнены расчеты и построены номограммы для определения параметров режима сварки угловых швов по защитным покрытиям (рис. 1) при  $\delta = 100...150$  мкм,  $d_s = 1,4$  мм;  $L \approx 15...17$  мм.

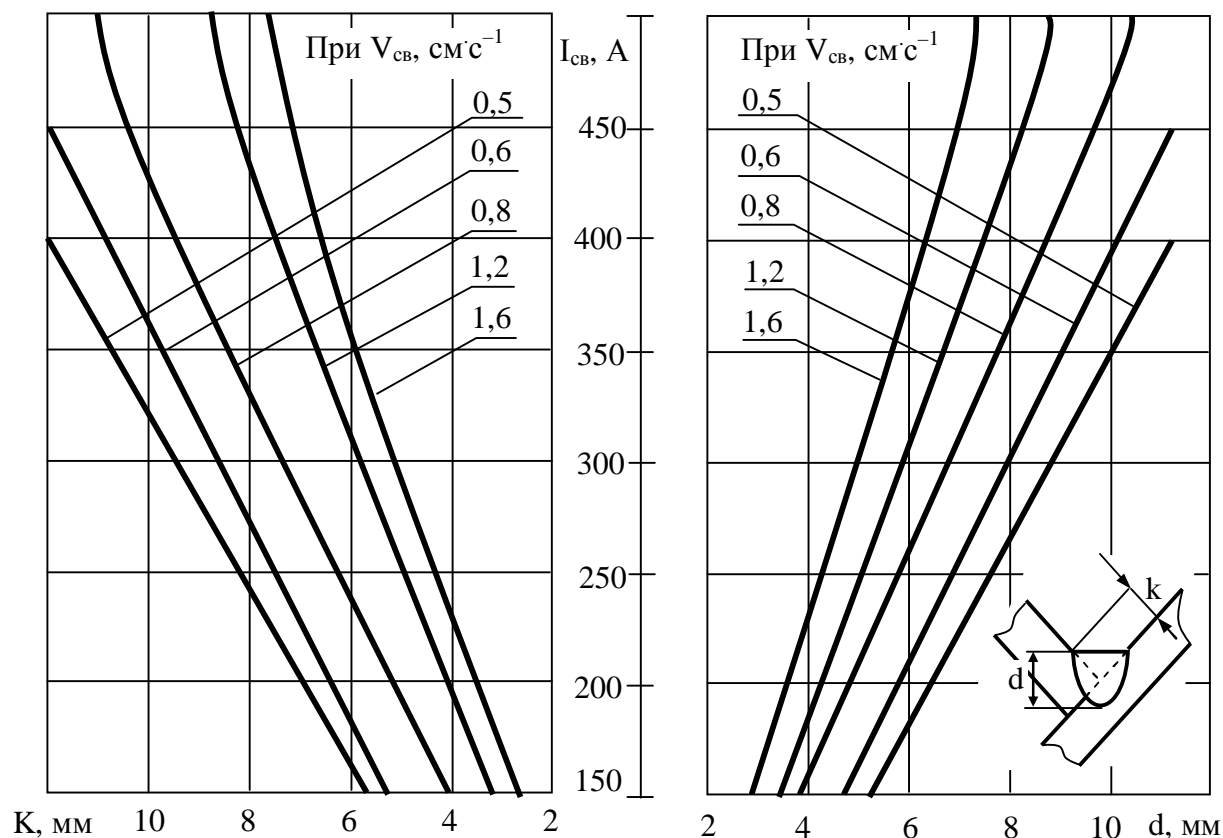


Рис. 1. Номограмма для определения тока дуги при сварке первого прохода углового шва по покрытию

Напряжение источников питания  $U_{ин}$  представляет собой сумму падений напряжений на дуге  $U_d$  и вылете электродной проволоки  $U_в$ . Падение напряжения на вылете можно рассчитать по формуле, полученной на основе экспериментальных данных:

$$U_в = 0,000864 jL_в e^{0,001983 jL_в / V_n}.$$

Расход углекислого газа зависит от скорости сварки и мощности дуги и обычно устанавливается опытным путем. При сварке угловых швов получена следующая эмпирическая формула:

$$G_{CO_2} = 0,48(I_{св}U_dV_{св})^{0,28}.$$

Имея приведенные выше зависимости, можно выполнить расчет режима сварки в углекислом газе угловых швов по защитному покрытию. При этом металл шва плотный, каких-либо включений или трещин не обнаружено (рис. 2).

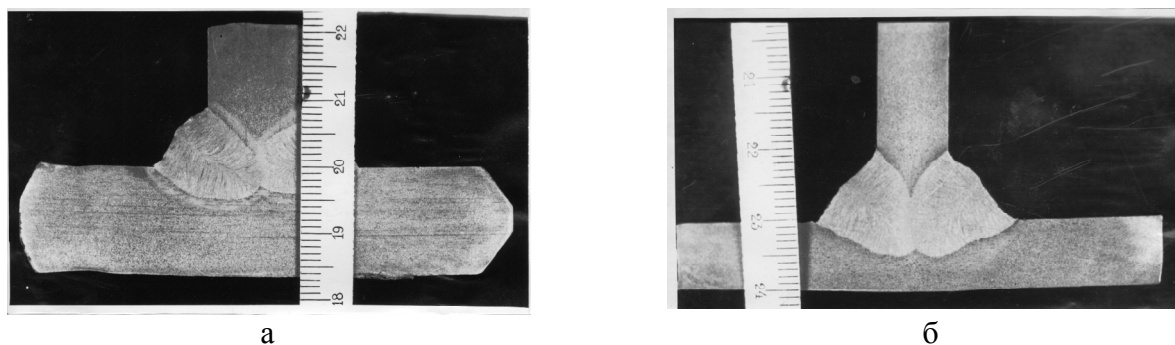


Рис. 3. Макрошлифы углового соединения из стали 09Г2С (толщина защитного слоя 25 мкм):  $\delta = 16$  мм (а),  $\delta = 10$  мм (б)

Металл шва, выполненный по защитному покрытию в углекислом газе, обладает высокими механическими характеристиками, а свойства сварных соединений определяются характеристиками основного металла.

## ВЫВОДЫ

Предложен алгоритм расчета технологических параметров дуговой сварки в среде углекислого газа по защитным покрытиям угловых швов. Показано, что при увеличении количества защитного покрытия в шве и повышения тепловой мощности дуги допустимые скорости сварки снижаются.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чертов И. М. Зварні конструкції / И. М. Чертов. – К. : Арістей, 2006. – 371 с.
2. Fedko V. Effect of the heat resistance of coating of the efficiency of protecting the surface of welded components against splashed metal droplets / V. Fedko, K. Tomas // *Welding international*. – 1997. – № 2. – P. 59–60.
3. Кассов В. Д. Повышение эффективности защиты поверхностей от набрызгивания при сварке / В. Д. Кассов, И. В. Шевченко, В. В. Чигарев // *Вестник Приазовского гостехуниверситета*. – Мариуполь : ПГТУ, 1998. – № 6. – С. 155–159.
4. Малыгина С. В. Оценка эффективности покрытий с учетом современных требований к производственным технологиям / С. В. Малыгина, В. К. Лысак // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 2. – С. 41–46.
5. Патент 8107 Україна, МПК В23К 35/36. Склад покриття для захисту поверхні від налипання бризок розплавленого металу / В. В. Чигарьов, С. В. Малигіна (Україна). – №200500500; заявл. 19.01.05; опубл. 15.07.05; Бюл. № 7. – 2 с.