

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791

В. М. Белоконь, канд. техн. наук, доц., И. А. Лукьянчиков, Д. А. Дондо

ДВИЖЕНИЕ КАПЕЛЬ РАСПЛАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В CO_2

Статья посвящена основному недостатку сварки плавлением в углекислом газе – разбрызгиванию электродного металла. Описано в математической форме движение капель из зоны дуги. Получены уравнения, определяющие траекторию, длину и время полета капель до поверхности свариваемых деталей. Доказано теоретически и экспериментально, что наибольшую длину и время полета имеют капли, вылетающие из зоны сварки под углом 45 град. Максимальная длина полета капель средней и большой величины составляет 100...110 мм. Результаты исследований позволили определить необходимое количество нанесения защитных покрытий, затрудняющих налипание жидких капель на поверхности свариваемых деталей.

Изготовление сварных конструкций в большинстве случаев связано со сваркой плавящимся электродом в защитных газах. Наиболее прогрессивной является сварка в защитном газе аргоне. Данный способ сварки характеризуется малыми потерями электродного металла (1...3 %); в основном это потери на испарение. Имеются и другие преимущества. Недостатком считается высокая стоимость аргона.

Снижает себестоимость защитного газа добавка в аргон углекислого газа. При этом процесс близок к сварке в аргоне, но кроме испарения металла происходит разбрызгивание. Потери составляют 3...5 % электродного металла. Этот способ сварки находит все более широкое применение. Однако из-за организационных и других причин распространение сдерживается. В результате на многих предприятиях применяется хорошо освоенная сварка плавящимся электродом в среде углекислого газа. Наряду с серьезными потерями электродного металла (в среднем 10 %), имеет место необходимость в удалении налипающих на поверхность свариваемых деталей брызг. Дополнительно затрачивается до 8...10 мин ручного труда

на удаление их с поверхности 1 м шва. Снизить трудозатраты возможно применением и нанесением перед сваркой защитных покрытий [1]. В этом случае необходимо знать ширину участка налипания брызг, расход защитного покрытия.

Капли электродного металла переходят в сварочную ванну (что характерно большинству из них) или вылетают из зоны сварки. В последнем случае их называют брызгами.

Пространство вокруг сварочной дуги в поперечном сечении при сварке без коротких замыканий разделяется на три зоны. На рис. 1 представлено поперечное сечение зон в виде схемы.

Первая зона характеризуется тем, что через нее пролетают брызги, часть из которых имеет наибольшую длину полета. Вторая зона – это зона, через которую в большинстве своем пролетают брызги, оседающие вблизи шва. Третья зона – это зона, через которую пролетают капли в сварочную ванну. Следует отметить, что часть капель металла попадает в сварочную ванну и из первой, и из второй зоны.

Рассмотрение иных сечений через дугу, отличных от показанных на рис. 1,

показывает лишь на увеличение количества брызг на поверхность металла, увеличение числа капель, попадающих в

сварочную ванну, но не на увеличение ширины участка налипания вдоль шва.

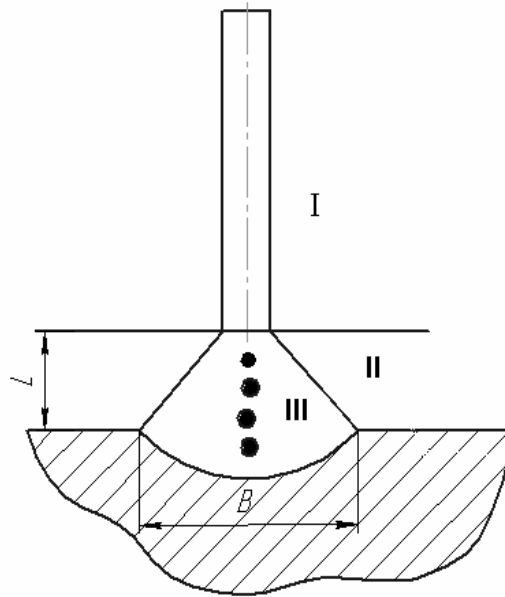


Рис. 1. Схема зон пространства вокруг дуги: I, II, III – зоны околосварочного пространства; L – длина дуги; B – ширина шва

Для определения кинематики движения капли (брызги) расплавленного металла поперек шва массой m и радиусом R , длины полета средних и больших капель, проходящих через зону

I с углом вылета к горизонту α и начальной скоростью v_a , рассмотрим схему, представленную на рис. 2.

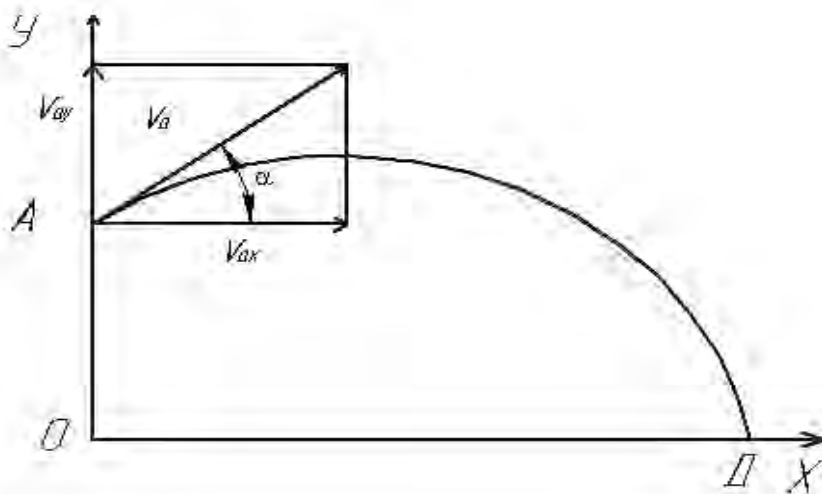


Рис. 2. Схема полета капли (брызги) электродного металла в зоне I

Скорость полета капле электроодного металла в начальный момент определены в [2].

Сопротивлением воздуха из-за его небольшого значения пренебрегаем.

На рис. 2 начало координат O совпадает с поверхностью сварочной ванны. Точкой вылета является точка A на оси OY , отрезок OA соответствует длине дуги L . Точка D на оси OX соответствует месту падения капли (брызги) на поверхность свариваемого металла. v_{ay} и v_{ax} – вертикальная и горизонтальная составляющие скорости v_a .

Начальные условия движения:

$$t_a = 0; \quad X_0 = 0; \quad Y_0 = L;$$

$$v_{ax} = v_a \cdot \cos \alpha;$$

$$v_{ay} = v_a \cdot \sin \alpha.$$

Дифференциальные уравнения движения капли (брызги) под действием постоянной по модулю и направлению силы тяжести G :

$$m\ddot{x} = \sum x_i = 0;$$

$$m\ddot{y} = \sum y_i = -G = -mg,$$

где g – ускорение свободного падения.

Проекция ускорения капли из этих уравнений:

$$\ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = -g.$$

Проинтегрируем дважды по времени t дифференциальные уравнения движения капли (брызги) вдоль оси OX :

$$\dot{x} = v_{ax} = c_1; \quad (1)$$

$$x = c_1 t + c_2. \quad (2)$$

Для определения постоянной интегрирования (c_1 и c_2) подставим в уравнение (1) проекцию начальной скорости $v_a = \dot{x} = v_a \cdot \cos \alpha$, получим $c_1 = v_a \cdot \cos \alpha$,

Подставив в уравнение начальные условия ($t_a = 0$; $x_0 = 0$), получим

$$\dot{x} = v_{ax} = v_a \cdot \cos \alpha; \quad (3)$$

$$x = v_a \cdot t \cdot \cos \alpha. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) показывают, что проекция скорости капли (брызги) на горизонтальную ось постоянна и горизонтальное перемещение совершается по закону равномерного движения со скоростью

$$v_{ax} = v_a \cdot \cos \alpha.$$

Проинтегрируем дважды по времени t дифференциальное уравнение $\ddot{y} = -g$, получим

$$\dot{y} = -gt + c_3; \quad (5)$$

$$y = \frac{-gt^2}{2} + c_3 t + c_4. \quad (6)$$

Подставим в уравнение (5) начальные условия ($t_0 = 0$; $y_a = v_a \sin \alpha$), тогда $c_3 = v_a \sin \alpha$.

Из уравнения (6) при $t_0 = 0$; $y_a = L$ получим $c_4 = L$.

При найденных значениях c_3 и c_4 выражения (5) и (6) примут вид:

$$v_{ay} = \dot{y} = v_a \cdot \sin \alpha - gt; \quad (7)$$

$$y = v_a \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} + L. \quad (8)$$

Определим время из формулы (4) и, подставив его в уравнение (8), получим уравнение траектории

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_a^2 + \cos^2 \alpha} + L. \quad (9)$$

Траектория движения капли представляет собой параболу с вертикальной осью.

Скорость движения капли по траектории

$$v = \sqrt{v_{ax}^2 + v_{ay}^2} = \sqrt{(v_a \cdot \cos \alpha)^2 + (v_a \sin \alpha + gt)^2}. \quad (10)$$

Движение капли (брызги), полученное сложением равномерного и равномерного вертикального движения, не является равномерным.

Определим дальность и продолжительность полета капли.

В точке Д падения капли (см. рис. 2) на поверхность металла $y = 0$, тогда (уравнение (8))

$$v_a \cdot t \cdot \sin \alpha - \frac{gt^2}{2} + L = 0.$$

Время от вылета до падения

$$t_n = \frac{v_a \cdot \sin \alpha + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL}}{g}. \quad (11)$$

Дальность полета определим, подставив значение t_a в уравнение (4):

$$L_n = x = v_a \cos \alpha \times \frac{(v_a \cdot \sin \alpha + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL})}{g}. \quad (12)$$

При сварке с короткими замыка-

ниями разлет капель металла в основном происходит в момент короткого замыкания. Для этого случая с очень небольшой погрешностью может быть принято $y = L = 0$. Тогда выражения (11) и (12) примут вид:

$$t_n = \frac{2v_a \cdot \sin \alpha}{g}; \quad (13)$$

$$L_n = \frac{v_a^2}{g} \cdot \sin 2\alpha. \quad (14)$$

Применительно к брызгам среднего и крупного размера проведем расчеты времени и длины полета. Результаты расчета сводим в табл. 1. Длина дуги принята равной 6 мм.

Результаты расчета показывают, что удаление брызг от шва средних (диаметром 0,8...1,0 мм), крупных (диаметром до 2,5 мм и более) дуг при оптимальных режимах сварки составляет 100...110 мм. Это подтверждают эксперименты; их результаты приведены в [5].

Табл. 1. Время и длина полета средних и крупных брызг при сварке без коротких замыканий

α , град	10		20		30		40		45	
v_a , м/с	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0
L_n , мм	49	34,8	59	65,6	79,5	88,4	90,4	100,4	101	102
t , с	1,06	3,54	2,09	6,98	3,06	10,2	3,94	13,12	4,33	14,4

Время и длина полета брызги незначительно зависят от длины дуги. Чем больше длина дуги, тем больше и длина, и время полета (на 0,5...1,5 %); в этом отличие сварки без коротких замыканий от сварки с короткими замыканиями.

Результаты расчетов длины и времени полета брызг, образовавшихся при коротком замыкании капля-сварочная ванна, приведены в табл. 2.

Для определения характера движения капель через зону II (см. рис. 1) рассмотрим схему, представленную на

рис. 3.

Обозначения на рис. 3 соответствуют обозначениям на рис. 2.

Определим траекторию полета брызг во второй зоне, рассмотрев и решив дифференциальные уравнения (как и для зоны I) или положив в формулах (11) и (12) отрицательные значения угла α . Тогда время полета

$$t_{n2} = \frac{(-v_a \cdot \sin \alpha) + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL}}{g}. \quad (15)$$

Табл. 2. Время и длина полета каплей, образовавшихся при коротком замыкании капля – сварная ванна

α , град	10		20		30		40		45	
v_a , м/с	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3	1,0
L_n , мм	40,5	34,5	58,4	64	77	86	90	99	100	101
t , с	1,0	3,2	2,1	6,9	3	10,1	3,9	12,6	4,0	14,3

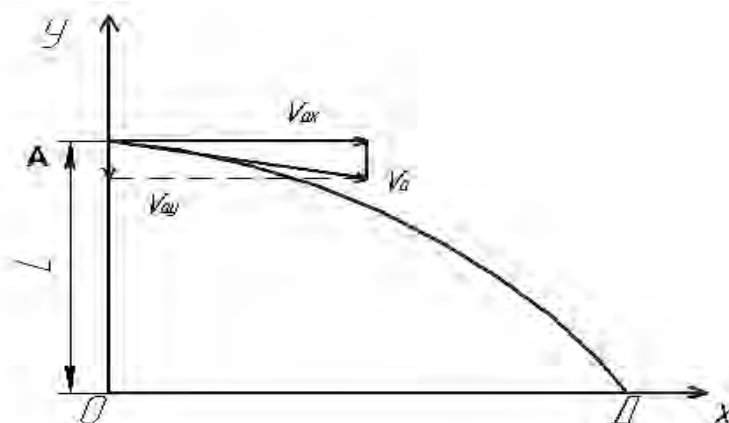


Рис. 3. Схема полета каплей (брызг) электродного металла в зоне II

Длина полета

$$L_{n2} = v_a \cdot \cos \alpha \times \frac{(-v_a \cdot \sin \alpha) + \sqrt{v_a^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2gL}}{g}. \quad (16)$$

Применительно к зоне III (электродный металл в виде каплей и частично паров переносится в сварочную ванну) в формуле (15), предположив, что $\alpha = 90^\circ$, получим наименьшее время полета капли до сварочной ванны

$$t = \sqrt{\frac{2L}{g}}. \quad (17)$$

Действительное минимальное время полета каплей будет несколько иным. В формуле (17) не учтено действие сил (магнитных, реактивных и др.), действующих на каплю при её полете через дугу. Погрешность составляет 10...20 % в зависимости от режима сварки.

Размером в поперечном сечении

зоны III является ширина шва. Ширину шва можно определить на основании тепловых расчетов. Основой для расчета являются режимы сварки, температура плавления металла. Температура плавления металла определяет поперечную границу зоны III.

Угол разлета каплей в зоне III приблизительно равен $\arctg \frac{B}{2L}$, где B – ширина шва.

Для коротких дуг ($0 < L < 8$ мм) напряжение на дуге определяется зависимостью

$$U_g = a + BL, \quad (18)$$

где a – суммарное падение напряжения на аноде и катоде, для токов 50...250 А $a = 17...19$ В [3]; B – падение напряжения на единицу длины дуги, $B = 2,3...2,7$ В/мм [3].

Из выражения (18)

$$L = \frac{U_g - a}{B}.$$

В табл. 3 приведены расчеты длины дуги для оптимальных режимов

стыковых соединений.

Табл. 3. Значения длины дуги при оптимальных режимах сварки

Толщина металла, мм	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	L, мм
2	1,0...1,2	180...250	22...26	1,6
4	1,2...1,6	290...350	23...32	3,6

Во всех случаях направление полета капля имеет случайный характер. Как теоретическим, так и опытным путем определено, что капли разбрызгиваются во всех направлениях и образуют объект, который следует удалять после сварки вдоль шва. Капли, падающие впереди дуги, попадают на непрогретый металл и не образуют прочного соединения. В опытах после обрыва дуги брызги до кратера удалялись с трудом, после него – относительно легко. Кроме всего прочего, часть капель, падающих впереди, при сварке переваривается.

Капли, имеющие траекторию полета с малыми скоростями полета, перемещаются в сторону, противоположную направлению сварки, попадают в сварочную ванну и кристаллизуются вместе с ней. Лишь капли, попадающие на швы, границу ванны и далее от нее, образуют брызги.

При относительно ровном разбрызгивании во все стороны и при движущемся источнике нагрева равномерное покрытие поверхностей брызгами на расстоянии от шва более 70 мм не наблюдается. Наибольшее количество брызг имеет место на полосе 60...70 мм от центра шва. Это соответствует сектору, наиболее густо перекрытому возможными траекториями полета и падения капля из зоны I и II, частично из зоны III.

Как показали расчеты и эксперименты, брызги, имеющие наибольшую длину полета, вылетают из зоны сварки

под углом примерно 45° к поверхности свариваемых деталей. Мелкие капли размером примерно 0,02 мм вылетают из области сварки с большой скоростью (около 40 см/с). Угол между направлением их полета и перпендикуляром к поверхности свариваемых деталей обычно не превышает 25° [2].

Капли размером 0,1...0,2 мм, как и очень мелкие (размером 0,02 мм), разлетаются на большие расстояния от шва, охлаждаются во время полета до температуры ниже температуры плавления. Они покрываются пленкой окиси при полете за зоной защитного газа в атмосфере воздуха и практически не имеют прочного сцепления с поверхностью свариваемых деталей. Как правило, проблем с удалением таких брызг не существует.

Мелкие брызги и пары металла покрывают внутреннюю поверхность сопел сварочных горелок. Прочного соединения брызг и паров с соплом не наблюдается, т. к. сопло изготавливается из медных сплавов и иногда дополнительно охлаждается. Наблюдается механическое сцепление, которое может быть существенно снижено нанесением защитных покрытий.

Наиболее распространенные и применяемые покрытия на производстве описаны в [1]. Количественный расчет расхода некоторых покрытий на основе исследований и сведений авторов приведен в [4–6]. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Табл. 4. Средний расход защитных покрытий на защиту от налипания брызг околошовной зоны 1 м длины шва

Покрытие	КБЖ	МВ	АЖС	МЖС	ГЛЖ-94
Состав покрытия	Сульфидно-спиртовая барда – 100 г, вода – 1000 г	Мел – 35 %, вода – 65 %	Алюминиевая пудра ПАК-1 – 50 г, жидкое стекло – 1000 г	Мел – 30 %, жидкое стекло – 70 %	Кремний – органическая жидкость
Расход, г	69	69	15	165	99

Расход защитного покрытия зависит от степени предварительной очистки поверхностей перед сваркой. При дробеструйной предварительной обработке поверхностей в состоянии поставки расход защитных покрытий примерно одинаков.

Выводы

1. Предложены математические зависимости для расчетного определения длины и времени полета капель (брызг) электродного металла при сварке плавлением в углекислом газе.

2. Расчетным и экспериментальным путями определена зона забрызгивания поверхностей свариваемых деталей вдоль шва.

3. Рассчитан расход некоторых распространенных покрытий для защиты поверхностей от налипания брызг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоконь, В. М.** Покрытия для защиты поверхностей от налипания брызг при сварке / В. М. Белоконь, М. Н. Иванцов, М. О. Поморцева // Сварочные технологии и оборудование. – 2005. – № 2. – С. 23–27.
2. **Новожилов, Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.
3. **Потапьевский, А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. – М.: Машиностроение, 1974. – 239 с.
4. Лакокрасочные покрытия / Под ред. Д. С. Чертфилда. – М.: Химия, 1968. – 640 с.
5. **Федько, В. Т.** Эффективность применения покрытий для защиты поверхностей от брызг при дуговой сварке / В. Т. Федько, А. М. Попков // Сварочное производство. – 1974. – № 10. – С. 39–40.
6. **Федько, В. Т.** Методика нормирования расхода покрытий для защиты поверхностей свариваемого металла при сварке в CO₂ / В. Т. Федько, К. И. Томас // Сварочное производство. – 1994. – № 4. – С. 20–22.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 24.02.2011

**V. M. Belokon, I. A. Lukianchikov,
D. A. Donda**
**Pressure of melted electrode drops
in CO₂ welding**

The paper is devoted to the main disadvantage of fusion welding in CO₂ i.e. electrode metal spattering. The movement of drops from arc zone is described in the mathematical form. The equation determining the length and time of the drops as the surface of the parts to be welded is obtained. It is shown theoretically and experimentally that the drops flying from arc zone at an angle of 45° have the largest length and longest time of flight. The maximum length of drop flight of an average and large size is 100...110 mm. The results of the research made it possible to determine the necessary quantity of protective coating which creates obstacles to sticking of liquid drops onto the surface of parts to be welded.