

УДК 621.791.75

Лаврова Е. В.

АНАЛИЗ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА КАПЛЮ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ НАПЛАВКЕ ПОД ФЛЮСОМ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

В работах [1–5] показано, что предлагаемые в настоящее время способы управляемого переноса электродного металла с торца электрода требуют дополнительных затрат и источников электроэнергии. Механические способы принудительного переноса электродного металла отличаются простотой и практически не требуют дополнительной энергии. В работах [3–5] авторами сконструировано и изготовлено устройство для наплавки под флюсом ленточным электродом с принудительным механическим переносом электродного металла. Это позволяет обеспечить стабильное проплавление основного металла при нанесении наплавляемого слоя и повысить производительность наплавки за счет равномерного распределения тепла по ширине ленточного электрода. Выбраны параметры наплавки ленточным электродом сплошного сечения, обеспечивающие максимальное повышение производительности процесса расплавления электродного металла. Снижена доля участия основного металла в наплавленном. Улучшена структура наплавленного металла и повышена его служебная характеристика. Поэтому применение оборудования для наплавки под флюсом ленточным электродом с управляемым переносом электродного металла является актуальной научной задачей, а технология наплавки ресурсосберегающей, что имеет важное практическое значение.

Однако при использовании принудительного переноса электродного металла возникает новая сила инерции, обеспечивающая контролируемый сброс капель жидкого металла.

Целью настоящей работы явилось определение сил, действующих на каплю электродного металла при наплавке под флюсом ленточным электродом, обеспечивающих ее принудительный сброс.

На каплю расплавленного металла, находящуюся на торце электрода, действуют следующие основные силы: гравитационная сила или сила тяжести (F_T), сила поверхностного натяжения ($F_{ПН}$), электродинамическая сила ($F_{ЭД}$), реактивная сила давления паров (F_P), сила давления потоков плазмы и бомбардировки заряженными частицами ($F_{П}$). Помимо этих сил, в ряде случаев, оказывают существенное влияние сила давления струи защитного газа и инерция движения капли, например, при вибрации электрода.

Предположим, что расплавленный металл ленточного электрода за время одного цикла колебательного движения должен сбрасываться в сварочную ванну в виде капли. Тогда, масса сбрасываемой капли будет определяться в зависимости от параметров выбранной кинематической схемы возбуждения колебаний торца ленточного электрода.

Сила тяжести (F_T). Способствует отрыву и удерживанию капель электродного металла с торца ленточного электрода. Она существенно влияет на перенос металла лишь при наплавке на малых токах.

Сила F_T оказывает существенное влияние только при значительных размерах капель. В зависимости от пространственного расположения шва сила F_T способствует отрыву капли от электрода (в нижнем положении), препятствует отрыву (в потолочном) или стремится отклонить каплю от оси электрода (в вертикальном положении). Капля на конце электрода имеет обычно шарообразную или эллиптическую форму. Силу F_T в этих случаях можно вычислить по простейшим зависимостям:

для сферической капли:

$$F_T = \alpha \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_K^3 \cdot \gamma_{ж} \cdot g, \quad (1)$$

для эллиптической капли

$$F_T = \alpha \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot R_K^2 \cdot h \cdot \gamma_{ж} \cdot g, \tag{2}$$

где α – коэффициент, учитывающий часть жидкого металла, остающегося на ленточном электроде; R_K – радиус капли, м; h – большая ось капли, м; $\gamma_{ж}$ – средняя плотность металла капли при температуре жидкой капли, кг/м³.

Размер капли определяют расчетным путем по скорости подачи ленточного электрода и частоте переноса. Так, с учетом температуры капли в расчетах можно принимать для сталей Св-08ГС и Св-08Г2С $\gamma_{ж} = 7 \cdot 10^3$ кг/м³ (при температуре капель 2200–2600 К).

Сила поверхностного натяжения ($F_{ПН}$). В процессе формирования капли удерживает ее на торце электрода. При замыкании капель дугового промежутка поверхностное натяжение металла ванны втягивает каплю и тем способствует отрыву ее от торца. Величина $F_{ПН}$ определяется межфазным натяжением на границе «металл – газ» или «металл – шлак» и геометрическими размерами капли [6].

Сила $F_{ПН}$ обычно препятствует переносу капель с торца ленточного электрода в ванну. Местом приложения силы $F_{ПН}$ может быть принято такое сечение на жидкой капле, в котором эта сила минимальна. До образования шейки местом приложения силы $F_{ПН}$ может быть принята плоскость, проходящая через границу между твердым и жидким металлом. В этом сечении силу $F_{ПН}$, направленную по касательной к поверхности капли, можно разложить на составляющие: осевую $F_{ПН(0)}$, удерживающую каплю на электроде, и радиальную $F_{ПН(P)}$, стремящуюся сжать каплю и образовать шейку (сечение А-А, рис. 1).

Эти составляющие можно определить следующим образом:

$$F_{ПН(0)} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma_{ПН} \cdot R_э \cdot \cos\varphi, \tag{3}$$

$$F_{ПН(P)} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma_{ПН} \cdot R_э \cdot \sin\varphi, \tag{4}$$

где $\sigma_{ПН}$ – коэффициент поверхностного натяжения материала электрода при заданной температуре в месте приложения силы $F_{ПН}$; φ – угол между касательной и образующей поверхности электрода в месте перехода от твердого к жидкому металлу.

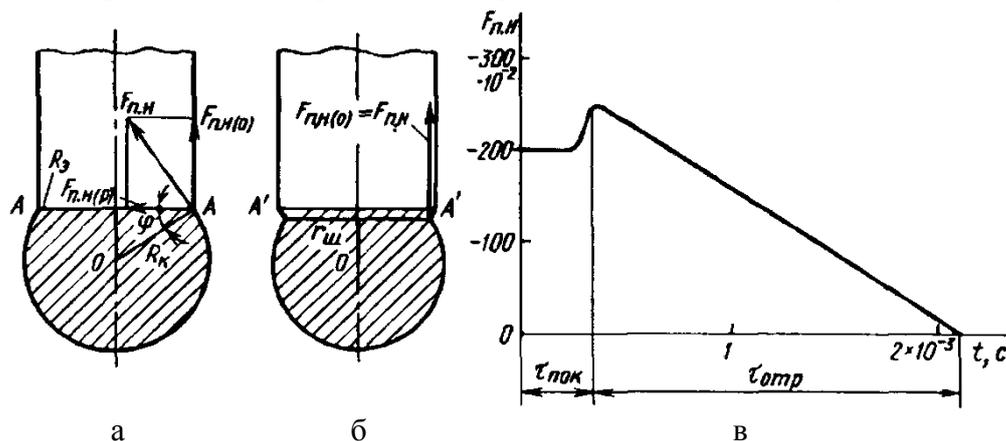


Рис. 1. Схема сил поверхностного натяжения, действующих на каплю до образования шейки, при образовании шейки и изменение силы поверхностного натяжения при капле [6]:

а – до образования шейки; б – при образовании шейки; в – изменение силы поверхностного натяжения при капле; $\tau_{ПОК}$ – длительность покоя; $\tau_{ОТР}$ – длительность отрыва

После образования шейки местом приложения минимальной силы $F_{ПН}$ можно считать плоскость, проходящую через минимальное сечение шейки жидкого металла (сечение А'-А', рис. 1, б).

Размер капель, отрываемых принудительно от электрода, влияет на соотношение сил $F_{ПН(О)}$ и $F_{ПН(Р)}$ и отрыв капель. Эксперименты показывают, что наиболее легкий отрыв капель наблюдается при соотношениях радиуса капли R_K к радиусу электрода $R_Э$ в пределах 1,15 – 1,5. При $R_K / R_Э < 1,15$ значительно уменьшается сила $F_{ПН(Р)}$, и увеличивается сила $F_{ПН(О)}$, что затрудняет образование шейки и отрыв капли. При $R_K / R_Э > 1,5$ размер капель чрезмерно велик, и принудительный отрыв их также затруднен. Определение силы $F_{ПН}$ затруднено в основном из-за отсутствия достоверных данных о величине коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{П}$. Литературные данные разноречивы: так для стали приведены значения $\sigma_{ПН}$ от $1000 \cdot 10^{-2}$ до $1570 \cdot 10^{-2}$ Н/см. В. И. Дятлов полагает, что коэффициент $\sigma_{ПН}$ мало зависит от температуры. Другие авторы придерживаются иного мнения.

Коэффициент $\sigma_{ПН}$ зависит от легирующих элементов, а также от окружающей каплю атмосферы. При увеличении содержания азота от 0,02 до 0,23 % в хромоникелевой стали сила $F_{ПН}$ повышается от $1100 \cdot 10^{-2}$ до $2500 \cdot 10^{-2}$ Н/см. Кислород понижает поверхностное натяжение. Изменение радиуса шейки при отрыве капли приводит к изменению $F_{ПН}$ (рис. 1, б).

Электродинамическая сила $F_{ЭД}$ возникает при прохождении тока по проводнику из-за взаимодействия тока с собственным магнитным полем. Если сечение проводника постоянно, то эта сила направлена по радиусу к оси проводника и стремится его сжать. Таким образом, осевая сила не зависит от направления тока. Изменение поперечного сечения проводника возможно в месте перехода от твердого электрода к жидкой капле и в месте перехода от капли к дуге. Местом приложения электродинамической силы при отрыве капли от ленточного электрода можно условно принять плоскость, в которой жидкая шейка минимальна, и в расчетах принимать R_1 – равным радиусу шейки, а R_2 – равным радиусу активного пятна на капле.

Сила реактивного давления испаряющегося металла и выделения газа. Расплавленный металл на торце ленточного электрода и изделия в зоне активных пятен находится при температуре, близкой к температуре кипения. Поэтому с активных пятен происходит интенсивное испарение, а иногда и газовыделение. Из газов, которые могут образоваться на торце ленточного электрода, существенно образование окиси углерода. Можно полагать, что окисление углерода оказывает заметное влияние только при наплавке высокоуглеродистых сталей. При наплавке низкоуглеродистых сталей окисление углерода и газовыделение невелико, и реактивное давление определяется в основном испарением металла. Поток паров направлен перпендикулярно к испаряющейся поверхности, но поскольку пары в дуге ионизируются, то дальнейшее направление потока пара определяется направлением собственного или внешнего магнитного поля в дуге.

Реактивную силу испарения можно подсчитать по формуле:

$$F_p = M \cdot v, \quad (5)$$

где M – масса металла, испаряющегося с поверхности в единицу времени, г; v – начальная скорость струи пара, м/с.

Аэродинамическая сила определяется аэродинамическим торможением капли в газовом потоке (H_r) и магнитно-кинематическими силами ($P_{м.к}$), обусловленными несбалансированностью гидростатического давления внутри капли и на поверхности раздела «жидкость – газ».

Сила аэродинамического торможения пропорциональна плотности газа, его скорости и эффективной площади сечения капли вдоль направления газового потока:

$$H_r = G^2 / (2g \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot l^2 \cdot \gamma_{го} \cdot S_m), \quad (6)$$

где G – секундный расход газа; D – диаметр покрытия электрода, мм; l – длина дуги, мм; $\gamma_{го}$ – объемный вес газа, образующегося при плавлении электрода, кг/м³; S_m – миделево сечение или эффективное сечение капли, спроектированное на направление газового потока.

Электромагнитная сила ($P_{э.м}$) является результатом наличия вокруг электрода при протекании по нему тока магнитного силового поля, оказывающего сжимающее действие на электрод (пинч – эффект). Радиальнонаправленная сжимающаяся сила (пинч-эффект) убывает к периферии по мере увеличения расстояния от проводника.

В жидком и газообразном проводнике эта сила создает гидростатическое давление, определяемое выражением:

$$P_{э.м} = (\mu \cdot I_{св} \cdot j / 4 \cdot (1 - p_i^2 / r_c^2)), \quad (7)$$

где p_i – расстояние от оси проводника (столба дуги) до рассматриваемой точки, м; r_c – радиус столба дуги, м; j – плотность тока в проводнике, А/м².

Давление ионного тока (P_i) на активные пятна обусловлено изменением количества движения ионов на границе «газ – металл» в результате их нейтрализации на поверхности катода. Давление ионного тока препятствует переносу капель и наиболее сильно проявляется при сварке на прямой полярности.

Расчет баланса сил, действующих на каплю, выполненный Амсоном, Салтером, и Дятловым, показал, что магнитно – кинетические силы $P_{м.к}$ и аэродинамическое торможение H_r , составляют 70–80 % сил, способствующих переносу капель металла.

Анализ вышеприведенных уравнений позволяет выяснить основные факторы, влияющие на размер электродных капель.

Основной силой, удерживающей каплю на электроде, является сила поверхностного натяжения. Ее можно уменьшить за счет использования в составе электродных покрытий поверхностно – активных веществ и увеличения сварочного тока, а, следовательно, температуры поверхности капли, что будет способствовать уменьшению размеров электродных капель.

С увеличением сварочного тока значительно возрастает электромагнитная и аэродинамическая силы, способствующие отрыву и переносу капель, а также интенсифицируются реакции газообразования в капле.

Давление газового потока на каплю зависит от состава и количества в покрытии газообразующих компонентов (мрамора, магнезита, целлюлозы и т. п.). Поэтому варьируя химический состав и толщину покрытия, режим сварки, можно регулировать аэродинамическую силу для реализации мелкокапельного переноса электродного металла.

Таким образом, перенос металла зависит от соотношения сил, приложенных к капле на торце электрода. Величины этих сил можно регулировать химическим составом покрытия (шлака), коэффициентом массы покрытия, режимом сварки, тем самым влияя на размеры капель с целью улучшения технологических свойств ленточных электродов.

Сила инерции ($F_{cu}(t)$). При воздействии механических колебаний на торец ленточного электрода появляется новая инерционная сила ($F_{cu}(t)$), Н, действующая на каплю электродного металла, которая при наплавке под флюсом ленточным электродом, зависит от массы капли m_k и ускорения движения торца электрода $a(t)$, меняющегося в процессе наплавки:

$$\vec{F}_{cu}(t) = m_k \cdot \vec{a}(t), \quad (8)$$

m_k – масса капли, г; $a(t)$ – ускорение движения торца электрода, м/с².

Из рис. 2 видно, что характер изменения сила инерции от времени имеет синусоидальный вид, с точкой минимум $-9,145 \cdot 10^{-4}$ Н и точкой максимум $1,217 \cdot 10^{-3}$ Н.

После определения каждой силы, действующей на каплю электродного металла при наплавке под флюсом ленточным электродом с принудительным механическим переносом жидкого металла, по отдельности, выведем суммарную формулу сложения сил, где:

1) сложение всех сил ($F_{\Sigma}(t)$) с учетом силы, полученной от принудительного механического переноса электродного металла ($F_{cu}(t)$):

$$F_{\Sigma}(t) = F_{ct} + F_{cu}(t) + F_{ed} - F_{pn} - F_r; \quad (9)$$

2) сложение всех сил ($Fl_{\Sigma}(t)$) без учета силы, полученной от принудительного механического переноса электродного металла ($F_{cu}(t)$):

$$Fl_{\Sigma}(t) = F_{ct} + F_{ed} - F_{pn} - F_r. \quad (10)$$

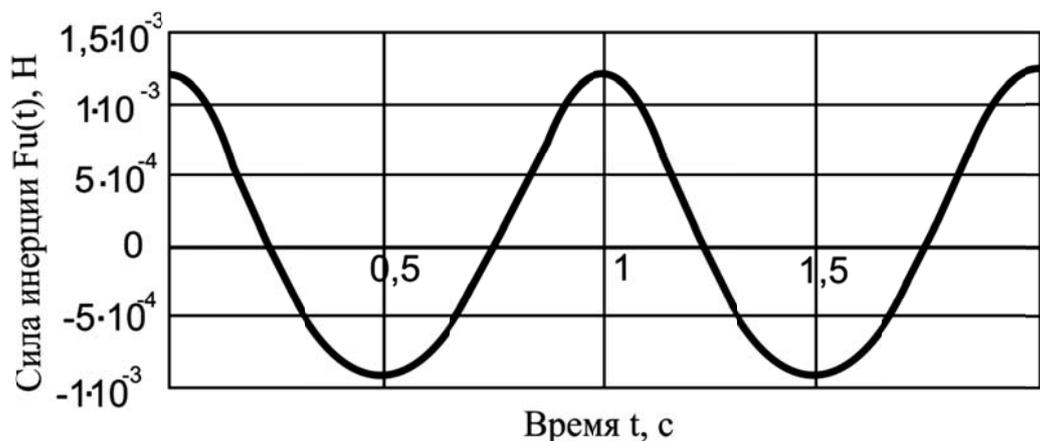


Рис. 2. Зависимость силы инерции F_{cu} , действующей на каплю электродного металла от времени

Для сравнения двух рассчитанных величин $F_{\Sigma}(t)$ и $Fl_{\Sigma}(t)$, введем коэффициент $K(t)$, который покажет влияние силы инерции, полученной от принудительного механического переноса электродного металла, действующей на каплю жидкого металла:

$$K(t) = \frac{F_{\Sigma}(t)}{Fl_{\Sigma}(t)}. \quad (11)$$

Для наглядности влияния силы инерции $F_{cu}(t)$, построим ряд зависимостей от времени.

Рассчитав коэффициент $K(t)$, равный отношению суммы сил приложенных к капле электродного металла с учетом силы инерции $F_{cu}(t)$ к сумме сил без учета силы инерции, получили следующую зависимость (рис. 3). Из рис. 3 видно, что коэффициент $K(t)$ составляет 2,064, значит сумма сил с учетом силы инерции превышает сумму сил без учета силы инерции (полученной в результате наложения принудительных механических колебаний) практически в 2 раза.

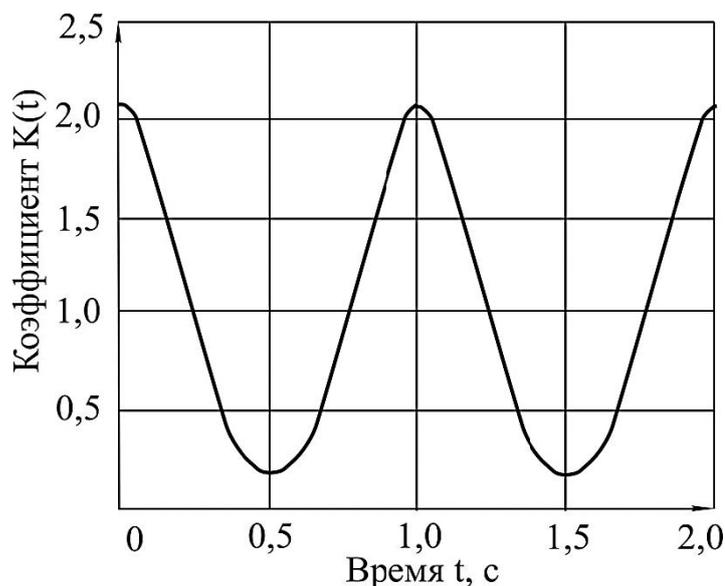


Рис. 3. График зависимости коэффициента $K(t)$ от времени

Для получения стабильного процесса переноса расплавленного металла в сварочную ванну необходимо выбрать такие параметры колебательного процесса, чтобы при заданных режимах наплавки обеспечивался сброс капель электродного металла за каждый цикл колебания.

Тогда масса сбрасываемой капли будет определяться в зависимости от выбранной кинематической схемы возбуждения колебаний конца, размерных конструктивных параметров устройства и скорости вращения возбудителя колебаний. При анализе эффективности тех или иных параметров управления процессом массопереноса электродного материала рассматриваемого здесь устройства, наибольший интерес вызывает получение максимального ускорения движения торца электрода и, следовательно, максимальной силы отрыва капли.

Посредством регулирования размерных конструктивных параметров предложенного устройства и скорости вращения возбудителя колебаний, можно получить многократное увеличение силы отрыва капель расплавленного электрода по сравнению с обычными устройствами подачи ленты. За счет этого достигается контролируемая регулярность перехода капель жидкого металла в сварочную ванну, повышение качества наплавленного металла и уменьшение вероятности и появления дефектов типа несплавлений.

Таким образом, на основании полученной зависимости и расчетных результатов можно говорить о целесообразности применения разработанного устройства [4] для наплавки под флюсом ленточным электродом с принудительными механическими колебаниями торца ленточного электрода.

ВЫВОДЫ

1. Определено влияние инерционной силы на баланс сил, действующей на каплю электродного металла. Сумма сил с учетом силы инерции превышает сумму сил без нее практически в 2 раза.

2. Целесообразно в дальнейшем выполнение исследований по оптимизации конструкций для наплавки ленточным электродом с использованием управляемого переноса электродного металла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В. А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла. (Обзор) / В. А. Лебедев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 10. – С. 45–52.
2. Лебедев В. А. Зависимость между скоростями импульсной подачи проволоки и ее плавления при сварке с короткими замыканиями / В. А. Лебедев // Автоматическая сварка. – 2007. – № 4. – С. 19–22.
3. Носовский Б. И. Разработка методики выбора параметров наплавки ленточным электродом с принудительным механическим переносом жидкого металла / Б. И. Носовский, Е. В. Лаврова // Автоматическая сварка. – 2011. – № 3. – С. 30–33.
4. Патент на корисну модель № 44885, МПК (2009) В23К 9/12. Спосіб широкошарового наплавлення під флюсом стрічковим електродом / О. В. Лаврова, Б. І. Носовський (Україна). – № 200810823; Заявл. 01.09.08; Опубл. 26.10.09, Бюл. № 20. – 4 с.
5. Лаврова Е. В. Математическая модель управляемого переноса электродного металла при наплавке под флюсом ленточным электродом / Е. В. Лаврова, В. П. Иванов, Б. И. Носовский – Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки : зб. наук. пр. – Маріуполь : ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2011. – № 2 (23). – С. 166–169.
6. Управление переносом металла при сварке с короткими замыканиями / И. С. Пинчук, В. Ф. Постаушкин, Г. Д. Куликов [и др.] // Вопросы сварочного производства. Челябинск: ЧПИ. 1975. Вып. 168. С. 116–123.