

УДК 621.791.75

Лаврова Е. В., Мех К. О.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ С УПРАВЛЯЕМЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

Как показано в работе [1] при использовании контролируемого переноса электродного металла можно управлять геометрическими параметрами сварного шва, снижать затраты на тепло- и энергозатраты в сварочную ванну. Таким образом, при применении предложенного способа контролируемого тепло-массо-переноса в сварочную ванну при сварке и наплавке в работе [2] показана эффективность и перспективность его использования.

В настоящее время отсутствуют сведения о влиянии параметров контролируемого переноса с торца электрода в сварочную ванну. Распределение температурных полей на поверхности изделия описывается математической моделью и алгоритмом расчета, основанных на уравнении теплопроводности с граничными условиями, соответствующими форме разделки кромок и характеристикам источника теплоты.

Известны аналитические решения уравнения теплопроводности [3] для расчёта температурных полей при сварке и наплавке, ограниченных кривыми линиями или поверхностями. Для упрощения расчетов был использован метод криволинейных координат.

Предложена [4] методика расчета максимальной температуры нагрева, времени пребывания металла выше заданной температуры, мгновенные скорости нагрева и охлаждения. В исследовании осуществлена корректировка аналитического расчета температур, а также основных параметров термических циклов точек при автоматической сварке и наплавке с учетом влияния перегрева основного металла в процессе плавления, перемещения расплавленного металла в хвостовую часть сварочной ванны под влиянием тока и скорости сварки.

Целью настоящей работы является моделирование процесса переноса тепловой энергии с торца электрода в сварочную ванну при сварке и наплавке с управляемым переносом электродного металла, учитывающим влияние инерционной силы, возникшей от принудительного воздействия на торец электрода и уравнение теплопроводности.

При физико-математическом моделировании формирования сварочной ванны, которое основывается на использовании численного решения нелинейного уравнения теплопроводности с учётом изменения формы свариваемых кромок при плавлении металла и возникновении кратера под действием давления дуги представлено в работе [3]. Представленные данные позволяют прогнозировать возникновение различных дефектов.

В работе [5] тепловой процесс сварки моделируется путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности при воздействии импульсов тока дуги и при ее поперечных колебаниях, рис. 1.

В работе [6] представлена нестационарная физико-математическая модель процесса сварки под флюсом, в которой учтены ее основные физические явления в гидростатической постановке. Формирование дуговой каверны определено по изотерме плавления флюса и разности плотностей порошкообразного и жидкого флюсов, а также учтены нагревание шлака излучением дуги и током, протекающим по нему. Поэтому существенное влияние оказывает теплоперенос капель при движении расплава сварочной ванны вследствие термокапиллярного эффекта.

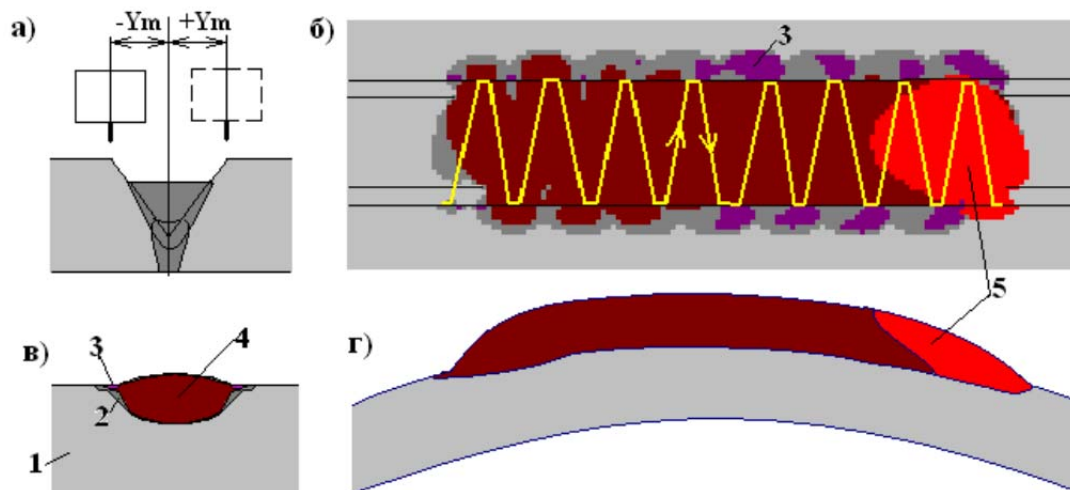


Рис. 1. Формирование сварочной ванны и шва при сварке с поперечными колебаниями: а – сечение шва перед началом сварки; б – вид на стык сверху; в – сечение шва; г – сечение по плоскости симметрии стыка; 1 – исходный металл; 2 – зона периодического проплавления; 3 – зона периодического удаления расплавленного металла в сварочную ванну; 4 – зона устойчивого проплавления; 5 – сварочная ванна [4]

Важным явлением при дуговой сварке и наплавке является формирование поверхности расплава сварочной ванны под действием сил гравитации без применения управляемого переноса электродного металла и инерционной силы, и с применением управляемого переноса электродного металла, а также электродинамического давления дуги, которым противостоит капиллярное давление (силы поверхностного натяжения) и внутреннее давление в расплаве, обеспечивающее постоянство объема жидкого металла при вариациях формы поверхности.

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 электродов.

При использовании механических колебаний с целью контролируемого тепломассопереноса с торца электрода в сварочную ванну, появляется новая инерционная сила F_{cu} , которая зависит от массы капли m_k и ускорения движения торца электрода, меняющегося в процессе наплавки.

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.

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

$$K(t) = \frac{F_{\Sigma}(t)}{Fl_{\Sigma}(t)}. \quad (1)$$

$$F_{\Sigma}(t) = F_{ct} + F_{cu}(t) + F_{ed} - F_{pn} - F_r, \quad (2)$$

$$Fl_{\Sigma}(t) = F_{ct} + F_{ed} - F_{pn} - F_r, \quad (3)$$

где F_{ct} – сила тяжести, Н;

$F_{cu}(t)$ – инерционная сила, Н;

F_{pn} – сила поверхностного натяжения, Н;

F_{ed} – электродинамическая сила, Н;

F_r – сила реактивного давления испаряющегося металла, Н.

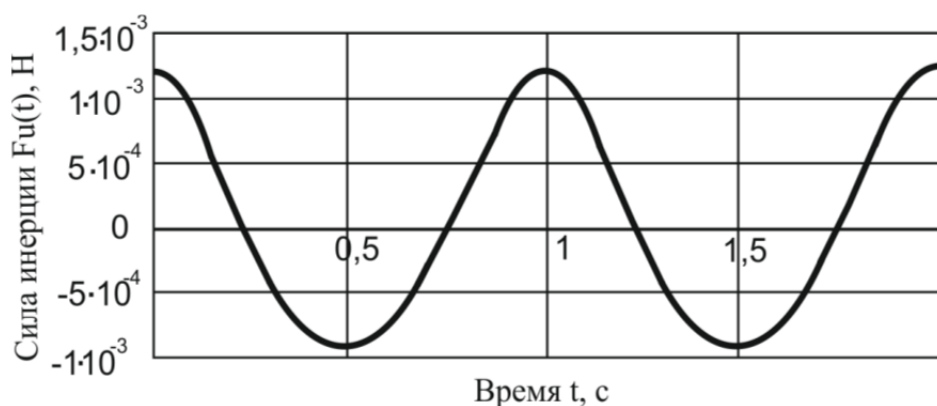


Рис. 2. Зависимость силы инерции F_{cu} , действующей на каплю электродного металла от времени

Для наглядности влияния силы инерции $F_{cu}(t)$, построим ряд зависимостей от времени. Исходными данными для расчета являются: межэксцентриковое расстояние: $e = 1,00$ мм; количество оборотов вала: $n = 1900$ об/мин; скорость перемещения: $V_{ne} = 33$ м/ч.

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).

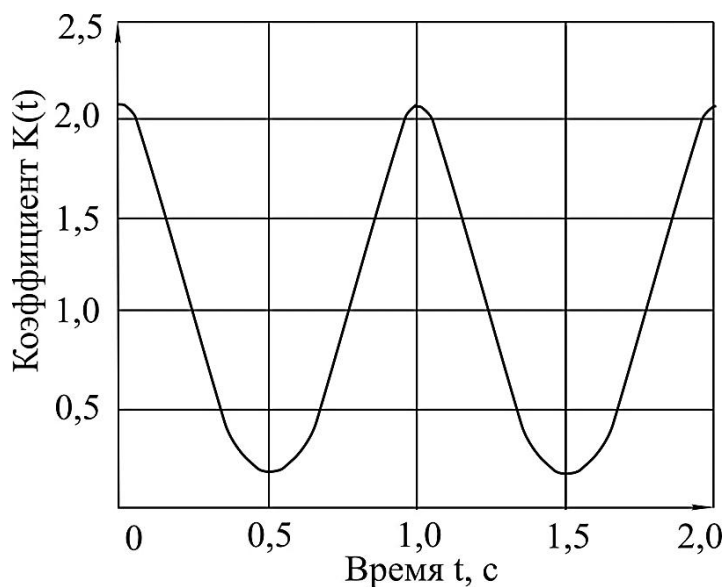


Рис. 3. График зависимости коэффициента $K(t)$ от времени

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.

Рассмотрим инерционную силу с помощью коэффициента увеличения силы отрыва капли с торца ленточного электрода.

Средняя скорость плавления ленточного электрода по всей ширине будет равна скорости подачи электрода. Тогда за одну секунду длина расплавленного участка ленты может быть определена по зависимости $\Delta l = V_{ne} \cdot t$, м, а масса расплавленного металла будет зависеть от поперечного сечением электрода A_e и плотности его материала ρ : $m_e = \Delta l A_e \rho$, кг.

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 возбuditеля колебаний: $m_k = m_e / n_c$ (n_c – скорость вращения эксцентрика, об/с). Очевидно, что 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.

Проектируя равнодействующую всех сил, приложенных к капле, на вертикальную ось (при наплавке в нижнем положении), можно оценить её расчетное значение для двух вариантов наплавки: с учетом действия принудительного механического переноса (R_{yu}) и без него (R_y). Тогда, эффективность какого-либо параметра управления процессом массопереноса электродного материала, можно оценить коэффициентом увеличения силы отрыва за счет действия инерционной силы $K_y = \frac{\bar{R}_{yu}}{\bar{R}_y} \geq 1$.

Не рассматривая здесь множество вариантов сочетания различных параметров управления процессом массопереноса с помощью предложенного устройства, приведем результаты расчета максимальной величины коэффициента K в зависимости от трех основных параметров (рис. 4): угла поворота верхних направляющих γ , величины эксцентриситета e и скорости вращения эксцентрика n .

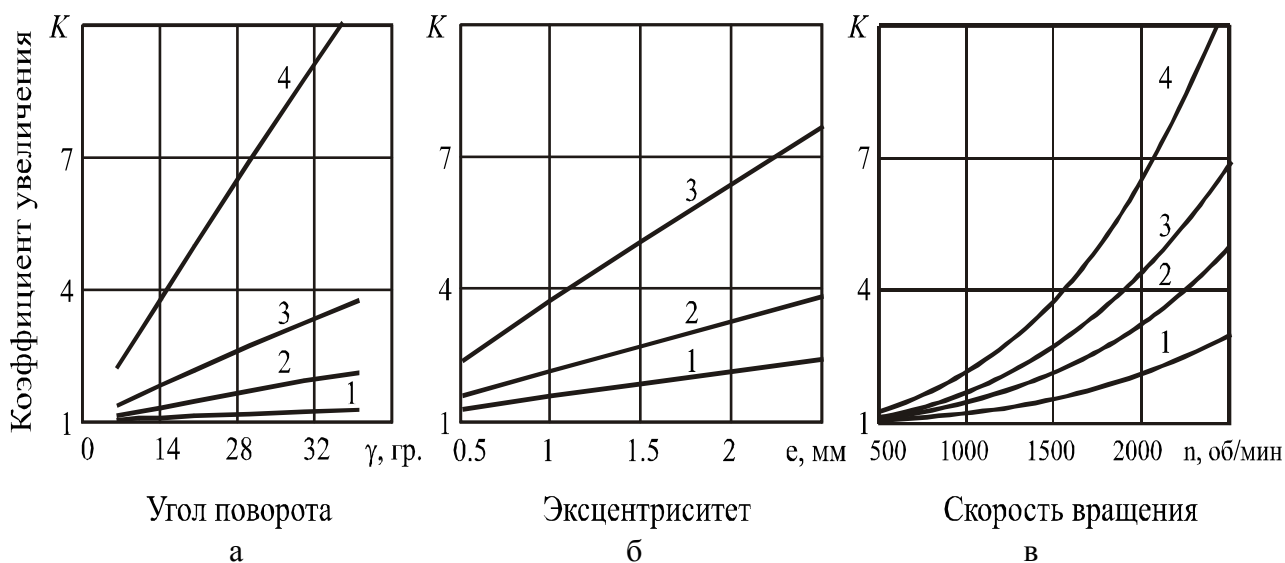


Рис. 4. Зависимость коэффициента увеличения силы отрыва капли от различных параметров (параметры см. в тексте)

Расчеты проводились при следующих параметрах: $a - l_1 = l_2 = 30$ мм; $e = 1,0$ мм; $n = 500, 1000, 1500, 2500$ об/мин., графики 1, 2, 3, 4 соответственно; $b - l_1 = l_2 = 30$ мм; $n = 1500$ об/мин, $\gamma = 10, 20, 50^\circ$, графики 1, 2, 3 соответственно; $v - l_1 = l_2 = 30$ мм; $e = 1,0$ мм; $\gamma = 10, 20, 30, 50^\circ$, графики 1, 2, 3, 4 соответственно.

Как видно из графиков на рис. 4, посредством регулирования размерных конструктивных параметров предложенного устройства и скорости вращения возбуждителя колебаний, можно получить многократное увеличение силы отрыва капель расплавленного электрода по сравнению с обычными устройствами подачи. 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 предложенного устройства с целью контролируемого тепло-массо-переноса при сварке и наплавке с управляемым механическим переносом электродного металла.

ВЫВОДЫ

Предложено моделирование тепловых процессов при сварке и наплавке с управляемым переносом электродного металла.

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 101288, МПК В23К 9/12 (2006.01). Устройство для наплавки ленточным электродом под флюсом / А. Н. Серенко, Е. В. Лаврова, В. П. Иванов, В. А. Серенко (Украина). – № а 201205838 ; заявл. 14.05.12 ; опубл. 11.03.13, Бюл. № 5. – 4 с.
2. Ivanov V. P. Improving the efficiency of strip cladding by the control of electrode metal transfer / V. P. Ivanov, E. V. Lavrova // Applied mechanics and materials. – 2014. – Vol. 682. – Pp. 266–269.
3. Бровман М. Я. Особенности расчета температурных полей при сварке и термической резке / М. Я. Бровман // Сварочное производство. – 2001. – № 7. – С. 10–14.
4. Попков А. М. Методика определения скоростей нагрева и охлаждения металла при сварке и времени его пребывания выше заданной температуры / А. М. Попков // Сварочное производство. – 2004. – № 6. – С. 3–5.
5. Физико-математическая модель орбитальной сварки неплавящимся электродом в инертных газах: концепция и возможности / А. В. Шитилов, В. А. Ерофеев, Е. М. Вышемирский, С. И. Полосков // Сварка и Диагностика. – 2011. – № 2. – С. 3–9.
6. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой камере / В. А. Судник, В. А. Ерофеев, А. В. Масленников, Д. В. Слезкин, Р. В. Цвелев // Сварочное производство. – 2012. – № 7. – С. 3–12.

Статья поступила в редакцию 11.03.2018 г.