УДК 621.791

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПРОЦЕССА СВАРКИ С СУХИМ ЛЬДОМ

А. М. МАМОНОВ
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.791

MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL CALCULATION OF THE DRY ICE WELDING PROCESS

A. M. MAMONOV

Аннотация. Дан краткий анализ процесса сварки и факторов, влияющих на качество сварного соединения. Разработана и предложена математическая модель расчёта, на основе сохранения равенства подводимых и отводимых тепловых потоков в процессе сварки. Получены формулы теплового расчета процесса сварки, позволяющие определить массу, скорость и место подачи сухого льда, для снижения температурной напряженности свариваемых деталей и улучшения качества сварного соединения.

Ключевые слова: процесс сварки, сварочная ванна, тепловой поток, температура, сухой лёд.

Abstract. The article provides a brief analysis of the welding process and factors influencing the quality of the welded joint. The mathematical model of calculation on the basis of preservation of equality of heat inputs and outputs in the process of welding is developed and offered. Are received formulas of thermal calculation of process of welding, allowing to define weight, speed and a place of giving of dry ice, for decrease in temperature intensity of the welded details and improvement of quality of the welded connection.

Keywords: welding process, welding bath, heat flow, temperature, dry ice.

Сварка плавлением представляет собой комплекс физико-химических процессов, протекающих в условиях высокой температуры, при значительной концентрации тепла в небольшом объеме. В результате сосредоточенного воздействия тепла сварочной дуги плавится электродный и основной металл. Расплавленный металл электрода переходит в сварочную ванну, в основном в виде капель, величиной от тысячной доли миллиметра до нескольких миллиметров. Размер капель и их количество зависит от силы тока, химического состава электрода и его покрытия. Нагрев и плавление металла в микроскопическом объёме осуществляется практически мгновенно [1].

При этом в свариваемом металле возникают большие температурные напряжения, способствующие образованию трещин и короблению сварной конструкции. Как отмечает ряд авторов в своих работах, для ограничения внутренних деформаций весьма эффективным является охлаждение зоны

сварки [2, 3]. Для снятия указанных напряжений используется сухой лёд [4].

Процесс сварки обусловлен равенством подводимого и отводимого тепловых потоков. При электродуговой сварке подводимый тепловой поток равен электрической мощности сварочной дуги:

$$\Phi_{П} = U \cdot I, \tag{1}$$

где U – напряжение; I – сварочный ток.

Подводимый тепловой поток сварочной дуги, за вычетом потерь на излучение, локализуется в сварочной ванне, осуществляя нагрев и плавление металла:

$$\Phi_{СВ} = \Phi_{П} \cdot K_{изл(CD)}, \tag{2}$$

где $K_{изл(CD)}$ – коэффициент учёта потерь теплового потока на излучение сварочной дуги в окружающую среду.

Так как процесс нагрева и плавления металла электрической дугой происходит практически одновременно, то масса металла в сварочной ванне, нагреваемая в единицу времени, равна массе расплавленного металла. Тепловой поток, поглощаемый сварочной ванной, определяется по формуле

$$\Phi_{СВ} = \left[C_{М} \cdot \left(T_{ЭД} - T_{1} \right) + \lambda_{М} \right] \cdot \frac{dm_{св}}{dt}, \tag{3}$$

где $\frac{dm_{св}}{dt}$ – скорость изменения массы металла в сварочной ванне; $C_{М}$ – удельная теплоемкость металла; $T_{ЭД}$ – температура электрической дуги; T_{1} – температура окружающей среды; $\lambda_{М}$ – удельная теплота плавления металла.

При сварке температура электрической дуги выше температуры плавления металла, что приводит к образованию газовой фазы над зоной расплавленного металла и его разбрызгивания. По мере удаления к периферии сварочной ванны температура понижается и на границе «жидкая – твердая» фазы температура равна температуре кристаллизации металла.

Масса металла, находящаяся в сварочной ванне в единицу времени, состоит из массы расплавленного металла свариваемых деталей и массы сварочной проволоки и определяется по формуле

$$\frac{dm_{св}}{dt} = \frac{I \cdot U \cdot K_{изл(CD)}}{C_{м} \cdot \left(T_{ЭД} - T_{1} \right) + \lambda_{М}}. \tag{4}$$

Масса сварочной проволоки, подаваемая в единицу времени, вычисляется по формуле

$$\frac{dm_{св}}{dt} = S_{пр} \cdot \rho \cdot V_{пр}, \tag{5}$$

где $\frac{dm_{св}}{dt}$ – скорость подачи массы проволоки; $S_{пр}$ – площадь поперечного сечения проволоки; ρ – плотность металла; $V_{пр}$ – скорость подачи проволоки.

Размеры сварочной ванны и время её существования зависят от способа сварки, режима сварки, физических свойств свариваемого материала, интенсивности охлаждения сварного шва. Глубина ванны равна толщине свариваемого материала, ширина – величине катета, выбираемого в зависимости от толщины свариваемого материала, а длина ванны составляет, как правило, две ширины катета.

Сварочная ванна образуется движением эллипсоида вдоль линии сварки с выбранной скоростью. Большая ось эллипса расположена в плоскости свариваемых деталей, малая ось расположена перпендикулярно сварному шву. Скорость сварки выбирается таким образом, чтобы за время существования ванны перемещение эллипсоида составило не более двух радиусов большой полуоси. Масса металла в сварочной ванне сварного шва находится по формуле

$$m_{св} = 2,33 \cdot \pi \cdot h \cdot k \cdot r_0^2 \cdot \rho, \tag{6}$$

где h – толщина свариваемых листов; k – коэффициент усиления шва; r_0 – радиус большой полуоси, равный половине сварочного катета.

Время существования сварочной ванны определяется по формуле

$$t_0 = \frac{m_{св}}{\frac{dm_{св}}{dt}}. \tag{7}$$

Скорость сварки вычисляется по формуле

$$V_{св} = \frac{2r_0}{t_0}. \tag{8}$$

Тепловой поток, локализованный в сварочной ванне, осуществляет нагрев свариваемого металла, при этом часть теплового потока теряется на разбрызгивание металла в процессе сварки и тепловое излучение сварочной ванны в окружающую среду. Тепловой поток, излучаемый сварочной ванной в окружающую среду, определяется по формуле

$$\Phi_{изл(св)} = K_{изл(св)} \cdot A_{св} \cdot (T_{П} - T_{1}), \tag{9}$$

где $K_{изл(св)}$ – коэффициент теплопередачи от расплавленного металла в окружающую среду; $A_{св}$ – площадь поверхности сварочной ванны; $T_{П}$ – температура плавления металла.

Тепловой поток, нагревающий свариваемые детали, находится по формуле

$$\Phi_{СВ} = U \cdot I \cdot K_{изл(CD)} \cdot K_{р} - K_{изл(св)} \cdot A_{св} \cdot (T_{П} - T_{1}), \tag{10}$$

где $K_{р}$ – коэффициент разбрызгивания металла.

В процессе сварки перемещение сварочной ванны осуществляется путём плавления металла перед движущимся электродом и его кристаллизация позади электрода. По мере удаления от сварочной ванны температура металла уменьшается. Падение температуры обусловлено теплоёмкостью металла и увеличением площади поверхности теплоотдачи. Часть металла около шва является зоной термического влияния. Размеры зоны зависят от вида сварки, режима и скорости её проведения, а также от химического состава свариваемого металла. Как отмечено в [1], линейные размеры участков околошовной зоны зависят от физических свойств свариваемого металла. Чем выше теплоёмкость и чем меньше теплопроводность, тем меньше будет по размерам зона термического влияния. Увеличение силы тока увеличивает размеры зоны термического влияния. Увеличение скорости сварки уменьшает зону термического влияния [5].

Тепловой поток, за вычетом потерь на теплоизлучение и разбрызгивание металла со сварочной ванны, распространяется по свариваемому металлу.

При этом одна часть потока $\Phi_{Д}$ поглощается теплоёмкостью свариваемого металла, нагревая его, а вторая за счет теплоотдачи поверхности рассеивается в окружающую среду:

$$\Phi_{Д} = \Phi_{М} + \Phi_{ТП}, \tag{11}$$

где $\Phi_{М}$ – тепловой поток, поглощаемый теплоемкостью свариваемого металла; $\Phi_{ТП}$ – тепловой поток, излучаемый в окружающую среду поверхностью свариваемого материала.

Распространение тепла в объеме свариваемого металла происходит по эксцентрическим поверхностям, равноудаленным от центра сварочной ванны. Для упрощения примем, что распространение осуществляется по кольцевым поверхностям и определяется по формулам:

$$d\Phi_{м(i)} = 2\pi r_i \cdot h \cdot dr \cdot \rho \cdot c_м \cdot dT_i; \tag{12}$$

$$d\Phi_{ТП(i)} = K_{изл} \cdot 2\pi r_i \cdot dr \cdot (T_i - T_1); \tag{13}$$

$$dT_i = T_{(i-1)} - T_i, \tag{14}$$

где r_i – текущее значение радиуса; dr – заданная толщина кольца; dT_i – разность температур на входе и выходе; $T_{(i-1)}$ – предыдущая температура (вход); T_i – текущая температура (выход).

Радиус колец изменяется от 0 до $r_з$, ограничиваемого размерами свариваемых деталей. Суммируя тепловые потоки $d\Phi_м$ и $d\Phi_{ТП}$, интегрируя выражения (12) и (13) по поверхности свариваемых деталей, получим формулу для определения теплового потока, нагревающего свариваемые детали:

$$\Phi_Д = \int_0^{r_з} 2\pi r \cdot dr \left[h \cdot \rho \cdot c_м \cdot \lambda \cdot T_i + K_{изл} \cdot \left(T_i - T_1\right) \right]. \tag{15}$$

Для увеличения теплоотдачи с поверхности сварочной ванны и поверхности свариваемых деталей используется диоксид углерода (сухой лёд). Применение сухого льда позволяет увеличить коэффициент теплоизлучения $K_{изл}$ и увеличить разность температур с $\left(T_i - T_1\right)$ до $\left(T_i - T_0\right)$. Тепловой поток, поглощаемый свариваемыми деталями с покрытием сухим льдом, определяется по формуле

$$\Phi_{Д(сл)} = \int_0^{r_з} 2\pi r \cdot dr \left[h\rho \cdot c_м \cdot \lambda \cdot T_i + K_{изл(сл)} \cdot \left(T_i - T_0\right) \right], \tag{16}$$

где $K_{изл(сл)}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности, покрытой сухим льдом; T_0 – температура сухого льда.

Тепловой поток, поглощаемый сухим льдом, вычисляется по формуле

$$\Phi_{сл} = \frac{dm_{сл}}{dt_{сл}} C_{сл} \cdot (T_1 - T_0) = \Phi_{Д(сл)} - \Phi_Д, \tag{17}$$

где $\frac{dm_{сл}}{dt_{сл}}$ – скорость подачи массы сухого льда; $C_{сл}$ – теплоемкость сухого льда.

Для установившегося режима процесса сварки, подставляя в формулы (15) и (16) выражения из формулы (10) и делая соответствующие преобразования, получим выражение для определения распределения температуры по

поверхности свариваемых деталей, охлаждаемых воздухом и сухим льдом.

При охлаждении воздухом окружающей среды (температурой T_1) выражение для теплового расчета процесса сварки имеет вид:

$$\int_0^{r_з} 2\pi\left[h\cdot\rho\cdot c_м\cdot dT_i - K_{изл}\cdot\left(T_i - T_1\right)\right]\cdot r\cdot dr =$$
$$= U\cdot I\cdot K_{изл(СД)}\cdot K_р - K_{изл(св)}\cdot A_{св}\cdot(T_П - T_1). \qquad (18)$$

При охлаждении сухим льдом (температурой T_0)

$$\int_0^{r_з} 2\pi\left[h\cdot\rho\cdot c_м\cdot dT_i + K_{изл(сл)}\cdot\left(T_i - T_0\right)\right]\cdot r\cdot dr =$$
$$= U\cdot I\cdot K_{изл(СД)}\cdot K_р - K_{изл(св)}\cdot A_{св}\cdot(T_П - T_0). \qquad (19)$$

Решая уравнения (18) и (19), получим распределение температуры поверхности свариваемых деталей в зависимости от расстояния до центра сварочной ванны при охлаждении воздухом окружающей среды и при охлаждении сухим льдом.

Проведенные расчеты показывают, что применение сухого льда увеличивает интенсивность снижения температуры по мере удаления от сварного шва и уменьшает зону термического влияния.

Выводы. Разработанная математическая модель теплового расчета процесса сварки с учетом баланса тепловых потоков позволяет: оценить распределение температуры по поверхности свариваемых деталей; определить массу, скорость и место подачи сухого льда в процессе сварки для снижения температурной напряженности; провести расчет тепловых потоков в свариваемом материале; наметить пути повышения качества сварной конструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник сварщика / Под ред. В. В. Степанова. – 3-е изд. – Москва: Машиностроение, 1974. – 520 с.

2. **Винокуров, В. А.** Теория сварочных деформаций и напряжений / В. А. Винокуров. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с.

3. **Сагалевич, В. М.** Методы устранения сварочных деформаций и напряжений / В. М. Сагалевич. – Москва. Машиностроение, 1974. – 248 с.

4. **Афшин, Х. М.** Снижение деформаций при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом тонколистовой аустенитной стали принудительным охлаждением высокотемпературной области: дис. … канд. техн. наук: 05.02.10 / Х. М. Афшин; БНТУ. – Минск, 2012. – 182 л.

5. **Петров, Т. П.** Теория сварочных процессов / Т. П. Петров, А. С. Тумаров. – Москва: Высшая школа, 1967. – 362 с.

E-mail: alan.mamonov.93@mail.ru.