

УДК 621.791.927.5

Цветков А. И., Власов А. Ф., Свиридов А. В., Титаренко К. Э.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛА ШВА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Такие теплообменные конструкции, как кристаллизаторы электрошлакового переплава, мартеновские и доменные фурмы изготавливаются сварными из меди и содержат продольные и поперечные швы. Поскольку материал шва почти всегда обладает пониженной теплопроводностью, в этой области возникает локальное повышение температуры. Поэтому целью данной работы является определение температурного режима сварного соединения с разнородными теплофизическими свойствами основного металла и металла шва [1–3].

Решение такой задачи экспериментальными методами связано с большими трудозатратами и сложностями экспериментального характера. Расчетные методы, основанные на решении уравнений теплопроводности, позволяют рассчитать температурные поля в области сварного соединения с учетом реальной формы шва, его размеров, неоднородности его теплофизических свойств металла шва при реальных граничных условиях теплоотдачи от стенки к воде [4].

Расчет температурного поля в области шва сводится к решению двумерной стационарной задачи теории теплопроводности для неоднородной среды.

Целью данной работы является изучение влияния теплопроводности металла шва на температурный режим сварного соединения.

В качестве расчетной схемы брали медный цилиндр с внутренним диаметром 100 мм и толщиной стенки 10 мм со вставкой из инородного металла в виде сварного шва, заполненный жидким шлаком при средней температуре 1620 °С и охлаждаемый водой. Численные значения величин, необходимых для расчета, взяты из литературных источников [4–6] и ранее выполненных авторами исследований.

Размеры сварного шва и толщину основного металла выбирали, исходя из практических соображений. Исходные данные, принятые для расчета, приведены в табл. 1, а схема тепловой системы сварного соединения показана на рис. 1.

Теплопроводность металла швов в вариантах 1, 2 и 3 принималась равной теплопроводности железа, теплопроводности швов, выполненных электродами «Комсомолец-100» или проволокой Бр КМцЭ-1 в аргоне и медной проволокой М1 под флюсом АН-348А. В остальных вариантах теплопроводность швов изменялась с шагом 50 Вт/(м·град) до теплопроводности технической меди. Согласно закону Фурье элементарный тепловой поток пропорционален коэффициенту теплопроводности и градиенту температуры в рассматриваемом направлении:

$$q_y = l \frac{dt}{dy}; \quad (1)$$

$$q_x = l \frac{dt}{dx}. \quad (2)$$

Для нахождения производных dt/dy и dt/dx изучаемую область делили координатными плоскостями на элементарные блоки размером ΔX и ΔY (рис. 2). Размеры блоков могут изменяться по направлениям осей.

Тепловые потоки, действующие в каждом узле сетки (рис. 3) в направлении осей координат, можно записать в виде уравнений:

$$q_{mj} = L_{mj}(t_m - t_j); \quad (3)$$

$$q_{jn} = L_{jn}(t_n - t_j); \tag{4}$$

$$q_{ij} = L_{ij}(t_i - t_j); \tag{5}$$

$$q_{kj} = L_{kj}(t_k - t_j). \tag{6}$$

Таблица 1

Исходные данные, принятые для расчета

№ вариант	Толщина основного металла, м	Размеры шва, м		Теплопроводность основного металла, Вт/(м·град)	Теплопроводность металла, Вт/(м·град)	Отводимый тепловой поток, Вт/м ²	Толщина гарнисажа, м	Теплопроводность гарнисажа, Вт/(м·град)	Коэффициент теплоотдачи от шлака к стенке, Вт/(м ² ·град)	Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде, Вт/(м ² ·град)
		b ₁	b ₂							
1	0,01	0,02	0,004	379	53,4	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
2	0,01	0,02	0,004	379	76	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
3	0,01	0,02	0,004	379	128	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
4	0,01	0,02	0,004	379	178	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
5	0,01	0,02	0,004	379	228	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
6	0,01	0,02	0,004	379	278	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
7	0,01	0,02	0,004	379	328	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222
8	0,01	0,02	0,004	379	379	1,86·10 ⁶	0,0015	1,95	1300	17222

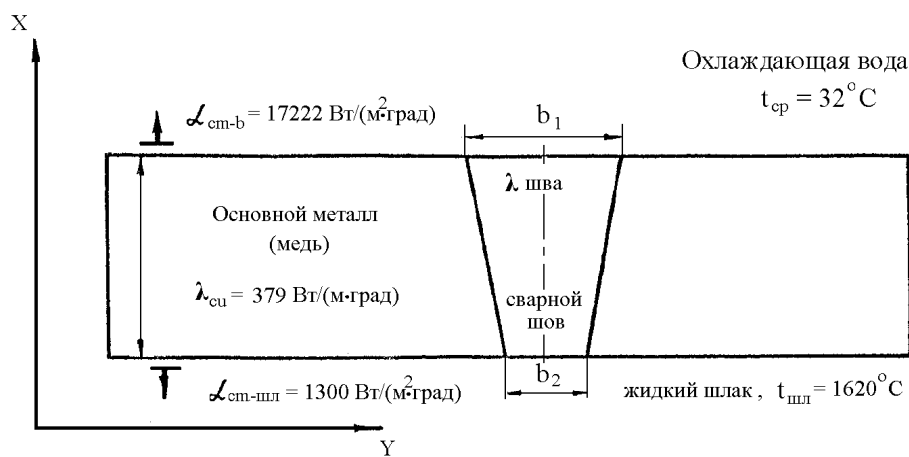


Рис. 1. Схема тепловой системы сварного соединения

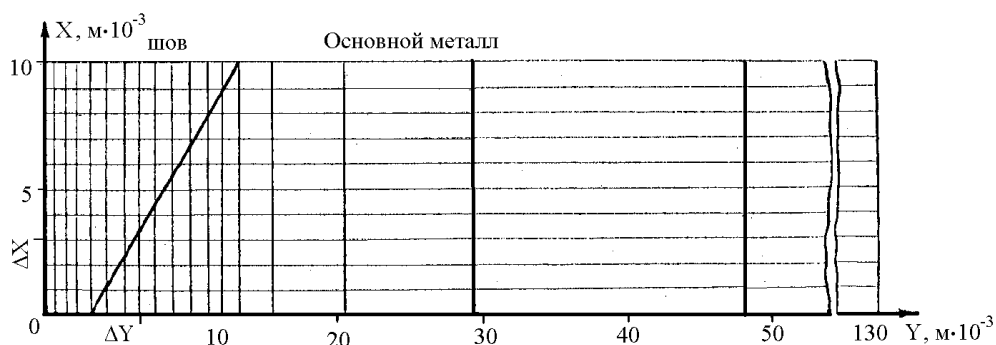


Рис. 2. Схема разбивки исследуемой области на блоки

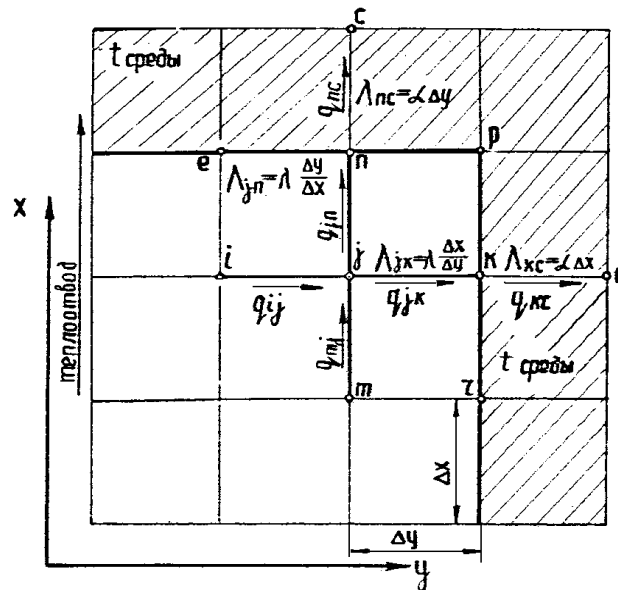


Рис. 3. Условия теплового баланса в узле сетки

Теплообмен с внешней средой определяется соотношениями:

$$q_{nc} = L_{nc}(t_n - t_c); \tag{7}$$

$$q_{kc} = L_{kc}(t_k - t_c), \tag{8}$$

где L_{mj} , L_{jn} , L_{nc} – проводимости в направлении оси X ;

L_{ij} , L_{kj} , L_{kc} – проводимости в направлении оси Y ;

t_j , t_i , t_m , t_n , t_k , t_c – температура в узловых точках и окружающей среды соответственно.

Распределенные тепловые связи реального тела заменяем дискретными проводимостями L , воспроизводящими тепловые связи между узловыми точками:

$$L_{jk(y)} = l \frac{\Delta X}{\Delta Y}, \tag{9}$$

$$L_{jn(x)} = l \frac{\Delta X}{\Delta Y}. \tag{10}$$

Теплообмен с внешней средой определяется проводимостями:

$$L_{nc} = \infty \cdot \Delta y, \tag{11}$$

$$L_{kc} = \infty \cdot \Delta x, \tag{12}$$

где ∞ – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Условие теплового баланса требует, чтобы сумма тепловых потоков, притекающих к каждому из узлов системы, была равна нулю:

$$\sum q_j = 0. \tag{13}$$

Для принятой системы деления на дискретные элементы теплопроводности уравнение (13) будет иметь вид:

$$q_{ij} + q_{mj} + q_{kj} + q_{jn} = 0, \tag{14}$$

где q_{ij} , q_{mj} , q_{kj} , q_{jn} – элементарные тепловые потоки, притекающие к узлу (j) по направлениям X и Y , численное значение которых можно рассчитать, используя выражения (3)–(8).

Уравнение (13) может также включать тепловые потоки, характеризующие теплообмен с внешней средой. Для узлов n и k это можно записать следующим образом:

$$q_{jn} + q_{en} + q_{np} + q_{nc} = 0; \tag{15}$$

$$q_{jk} + q_{rk} + q_{pk} + q_{kc} = 0. \tag{16}$$

Выразим элементарные тепловые потоки, притекающие к j -у узлу, через разности температур и проводимости в соответствии с уравнениями (3)–(6):

$$L_{ij}(t_i - t_j) + L_{kj}(t_k - t_j) + L_{mj}(t_m - t_j) + L_{jn}(t_n - t_j) = 0;$$

$$L_{ij}t_i + L_{kj}t_k + L_{mj}t_m + L_{jn}t_n - t_j(L_{ij} + L_{kj} + L_{mj} + L_{jn}) = 0.$$

Подобные уравнения можно записать для всех узлов системы, в том числе и для граничных. Полная система уравнений для решаемой задачи имеет вид:

$$At = q, \tag{17}$$

где A – матрица элементов проводимости всей системы;

t – вектор неизвестных температур в узлах;

q – вектор свободных членов.

Данная система воспроизводит все тепловые связи изучаемой области. Обозначение узлов, в которых определяется температура t_i , составляющих матрицу системы уравнений, показано на рис. 4. Принятая система деления исследуемой области на элементы теплопроводности предусматривает, что линия сплавления проходит ~ через расчетные узлы. Элементы теплопроводности шва, расположенные выше линии сплавления, рассчитывали с учетом λ шва: элементы, расположенные ниже линии сплавления, по λ основного металла. Поскольку температурное поле сварного соединения симметрично относительно оси шва, расчет проводили только для одной половины исследуемой области. Расчетные значения температур для характерных точек $t_1 - t_g$ (рис. 5) приведены в табл. 2.

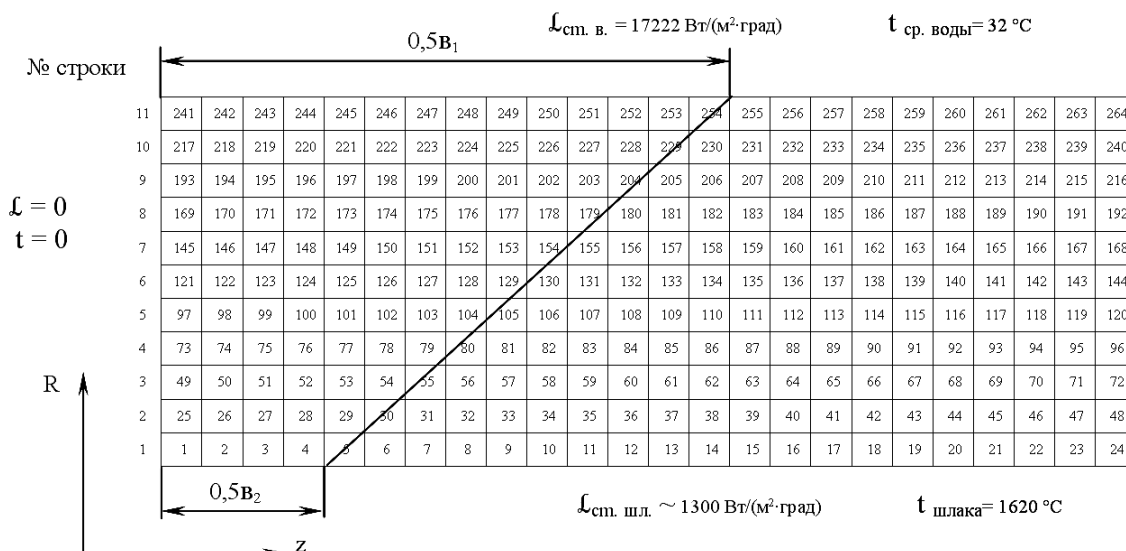


Рис. 4. Схема нумерации узлов для задания граничных условий

Как видно из полученных расчетных данных, наличие сварного шва с более низкой теплопроводностью, чем основной металл, способствует повышению температуры внутренней поверхности стенки в зоне сварного соединения. При теплопроводности шва 53,4 Вт/(м·град), что соответствует теплопроводности железа, температура его со стороны плавильного пространства достигает 289 °C и интенсивно уменьшается в околошовной зоне до температуры основного металла.

Следует отметить, что температура нагрева металла в околошовной зоне, наиболее разупрочненной части сварного соединения, значительно ниже той температуры, которая принимается как предельно допустимая, исходя из условий прочности меди (до 50 °С).

С понижением теплопроводности металла шва наблюдается уменьшение температуры шва с наружной (водоохлаждаемой) поверхности кокиля, что, очевидно, связано с особенностями прохождения теплового потока через сварное соединение.

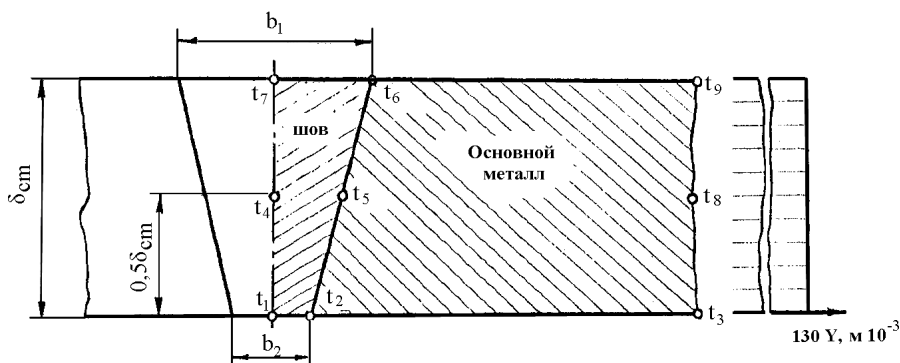


Рис. 5. Схема расположения характерных точек для определения температуры сварного соединения

Таблица 2

Расчет значения температуры в зоне сварного соединения

№ вариантов	Теплопроводность металла шва, (Вт/см·град)	Температура, °С								
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉
1	53,4	289	242	187	184	190	162	92	152	138
2	76	260	230	187	179	183	162	103	148	138
3	128	228	214	187	172	175	162	119	144	138
4	178	212	205	187	169	170	162	126	141	138
5	228	203	198	187	167	167	162	130	140	138
6	278	196	194	187	165	165	162	133	139	138
7	328	190	190	187	163	164	162	136	139	138
8	379	187	187	187	162	162	162	138	138	138

ВЫВОДЫ

1. Разработана расчетная схема, позволяющая определить характер изменения рабочей температуры в зоне сварного соединения с разнородными теплофизическими свойствами.
2. Установлен характер изменения температурного режима в различных точках сварного соединения в зависимости от теплопроводности металла шва при постоянном тепловом потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Готин В. Н. Влияние толщины стенки кристаллизатора и расхода охлаждающей воды на условия формирования слитка при вакуумном дуговом переплаве / В. Н. Готин // Труды ЦНИИ черной металлургии им М. П. Бардина. – М. : Металлургия, 1970. – Вып. 75. – С. 178–180.
2. Медовар Б. И. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Б. И. Медовар. – Киев, Наукова думка, 1978. – 303 с.
3. Цикерман А. Л. Температурные условия работы стального кристаллизатора вакуумных дуговых печей / А. Л. Цикерман // Сб. научн. тр. ВНИИ ЭТО. – М., 1969. – Вып. 3. – С. 54–60.
4. Каменский Ю. М. Тепловая стабильность шлаковой ванны и структура ее пограничного слоя / Ю. М. Каменский // В кн. : Специальная электрометаллургия. – Киев, Наукова думка. – 1972. – Ч. 1. – С. 24–33.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М. : Госинергоиздат, 1956. – 392 с.
6. Зусин В. Я. Сварка и наплавление цветных металлов и сплавов на предприятиях Мариупольского региона / В. Я. Зусин // Автоматическая сварка. – 2001. – № 9. – С. 45–47.