

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ПОЛЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Волгоградский государственный технический университет (e-mail:weld@vstu.ru)

Изложены особенности расчета теплового баланса электрошлаковой наплавки в токопроводящем кристаллизаторе с полым электродом, который позволяет оценить тепловой режим процесса наплавки, его устойчивость и качество расплавления присадочного материала.

Features of calculation of thermal balance electroslag weld deposition in a current-carrying crystallizer with a hollow electrode which allows to estimate a thermal mode of process weld deposition, its stability and quality of fusion feeding a material are stated.

*Ключевые слова:* электрошлаковая наплавка, токопроводящий кристаллизатор, полый электрод, композиционная проволока, тепловой режим, тепловая мощность.

В отличие от традиционных технологических процессов ЭШН, в которых задействован один тепловой источник, в новой технологии наплавки [1] задействованы два электрических контура постоянного тока, обеспечивающие более эффективную генерацию тепла в шлаковой ванне. Можно полагать, что теплота, выделяющаяся в первом контуре "токоподводящая секция-шлак-изделие" (рис. 1), расходуется на

поддержание температуры шлака, необходимой для устойчивого существования электрошлакового процесса.

Тепловой источник второго контура "полый электрод-шлак-изделие" обеспечивает качественное расплавление подаваемых через полость электрода электронейтральных металлических присадочных материалов: проволоки, стержней, порошков, а также композиционных

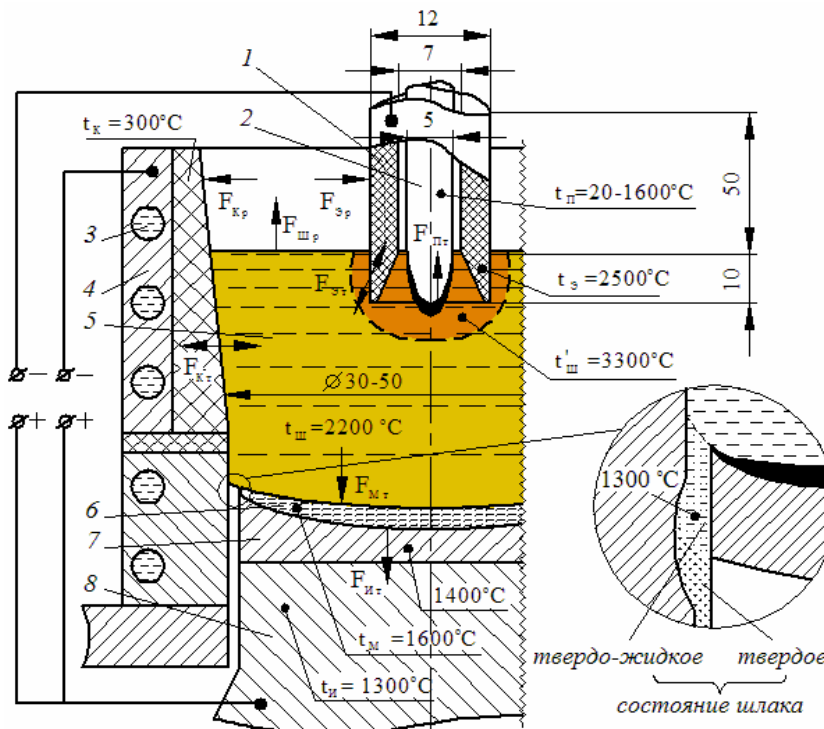


Рис. 1. Схема ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с полым электродом:

1 – полый электрод; 2 – композиционная проволока; 3 – водяное охлаждение; 4 – токоподводящая секция; 5 – шлаковая ванна; 6 – металлическая ванна; 7 – наплавленный металл; 8 – изделие;  $F_{к(р, т)}$ ,  $F_{э(р, т)}$ ,  $F_{шп}$ ,  $F_{пт}$ ,  $F_{мт}$ ,  $F_{ит}$  – поверхности теплопередачи путем излучения (индекс "р") и теплопроводностью (индекс "т"); кристаллизатора, электрода, шлаковой ванны, присадочного материала, металлической ванны и изделия

проволок, содержащих тугоплавкие легирующие компоненты [2].

Для количественной оценки теплового режима ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с полым электродом требуется расчет теплового баланса шлаковой ванны в мгновенном варианте. Известные методики расчета теплового баланса шлаковой ванны [3], не учитывают технологические особенности процесса ЭШН, способ подвода тока к шлаку и т. д., вследствие чего не могут быть использованы в практике. Цель работы состоит в составлении теплового баланса и выявлении долевого распределения выделяемой в шлаке тепловой мощности.

В общем виде тепловой баланс ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с полым неплавящимся электродом имеет вид:

$$Q_{\text{шк}} + Q_{\text{шэ}} = q_{\text{кр}} + q_{\text{п}} + q_{\text{и}} + q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + q_{\text{п}} + q_{\text{эр}} + q_{\text{э}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{шк}}$ ,  $Q_{\text{шэ}}$  – тепловые мощности, выделяющиеся в шлаковой ванне от ее нагрева током, проходящим в контуре "токоподводящая секция-шлак-изделие" и "полый электрод-шлак-изделие"; тепловая мощность, передаваемая шлаковой ванной радиационным путем (с индексом "р"), теплопроводностью и конвекцией следующим потребителям теплоты:  $q_{\text{п}}$  – присадочной проволоке;  $q_{\text{м}}$  – металлической ванне,  $q_{\text{и}}$  – наплавляемому изделию,  $q_{\text{э}}$ ,  $q_{\text{эр}}$  – полуму электроду,  $q_{\text{кр}}$ ,  $q_{\text{к}}$  – токоподводящей секции кристаллизатора,  $q_{\text{п}}$  – потери в окружающую среду.

Теплота шлаковой ванны расходуется преимущественно за счет теплопроводности, но небольшая ее часть передается радиационным путем ( $Q_{\text{р}}$ ). Вся тепловая мощность, расходуемая при электрошлаковой наплавке, определяется по выражению:

$$Q_{\text{р}} = \sum U_i I_i, \quad (2)$$

где  $U_i$ ,  $I_i$  – величины напряжения и тока каждого из источников сварочного тока.

Тепловую мощность  $Q_{\text{р}}$  определяли по формуле на основе закона Стефана-Больцмана для конечных поверхностей [2], которая в данном случае позволяет рассматривать взаимодействие контактирующих поверхностей как взаимно перпендикулярных: шлаковая ванна – излучатель теплоты ( $F_1$ ) и один из ее приемников ( $F_2$  – контактирующая со шлаком поверхность кри-

сталлизатора, электрода и т. п.). Взаимную поверхность излучения определяли из выражения:

$$H = \varphi' (1 - f) F_1, \quad (3)$$

где  $\varphi'$  – локальный угловой коэффициент облучения, характеризующий долю энергии, передаваемой на поверхность  $F_2$ ;  $f$  – коэффициент занятости поверхности шлаковой ванны присадочным или электродным материалом. При определении потерь тепла в окружающее пространство значение коэффициента  $\varphi$  принимали равным единице.

Количество теплоты, передаваемой при установившемся электрошлаковом процессе шлаковой ванной кристаллизатору, неплавящемуся электроду, присадочной проволоке и металлической ванне посредством одновременного действия теплопроводности и конвекции ( $Q_{\text{т}}$ ) равно:

$$Q_{\text{т}} = Q_{\text{п}} - Q_{\text{р}}, \quad (4)$$

Для расчета необходимо определить действительные температуры приемников теплоты  $t_i$ . В расчете допускали, что эти температуры могли бы иметь шлаковая ванна или приемники теплоты, если бы все содержащееся в них тепло было равномерно распределено по их объему.

В околоэлектродном объеме шлака (рис. 1) существует высокотемпературная область, в которой он нагрет до средней температуры  $t_{\text{ш}}^1 = 3300$  °С. Тепло, выделяющиеся в этой области, преимущественно передается присадочной проволоке. Поэтому при определении усредненного коэффициента теплопередачи  $\alpha_{\text{ср}}$  и количества тепла  $Q_{\text{т}}$ , передаваемого присадочной проволоке, использовали температуру шлака  $t_{\text{ш}}^1$ , а для остальных приемников тепла усредненную температуру шлаковой ванны –  $t_{\text{ш}}$ , равную 2200 °С. Расчет  $Q_{\text{т}}$  вели по уравнению Ньютона-Рихмана.

При расчете установлено, что  $Q_{\text{т}}$  может иметь отрицательное значение. Это показывает, что при направлении градиента распространения тепла от поверхности теплопередачи в шлаке, контактирующем с рассматриваемой поверхностью, выделяется тепла больше, чем необходимо для поддержания электрошлакового процесса. Следовательно, избыток тепла может расходоваться на нагрев и расплавление присадочной проволоки, что нужно учитывать при определении общего количества тепла  $Q_{\text{тп}}$ , поступающего из всего объема шлаковой ванны в проволоку.

Для качественного протекания процесса электрошлаковой наплавки требуется равенство (с учетом потерь) тепловых мощностей: передаваемой шлаковой ванной элементарному объему плавящейся проволоки  $Q_{Тп}$  и необходимой мощности для расплавления этого объема проволоки  $Q_{Нп}$ .

При решении задачи теплопроводности полагали, что прогрев присадочной проволоки в шлаке по ее радиусу равномерен и градиент температур представляется в виде соотношения разности температур шлака и проволоки в высокотемпературной области к диаметру проволоки. Таким образом, необходимую для расплавления присадочной проволоки тепловую мощность можно рассчитать по формуле:

$$Q_n = G_n [c_{cp} (T_{пл} - T_n) + q_{ск}], \quad (5)$$

где  $G_n$  – производительности наплавки, г/с;  $T_n$ ,  $T_{пл}$  – температуры;  $c_{cp}$  – удельная теплоемкость, Дж/г·К;  $q_{ск}$  – скрытая теплота плавления, Дж/г.

С использованием полученных зависимостей выполнен расчет мгновенного теплового баланса шлаковой ванны. Исходными данными для расчета служили средние температуры приемников теплоты и шлака АНФ-6, измеренные в условиях установившегося процесса ЭШН и сопоставимых значениях токов (150–170 А) в каждом контуре электропитания шлаковой ванны. С учетом того, что тепловоспринимающая способность контактирующей со шлаком плавящейся композиционной проволоки определяется совокупностью теплофизических свойств составляющих ее металлических компонентов (проволок, порошков, слоев оболочки), для расчета значения  $Q_n$  по формуле (5) использовали зависимости [2].

Результаты расчета теплового баланса шлаковой ванны показали, что в рассматриваемой схеме ЭШН расход тепла на нагрев и плавление основного металла почти такой же, как и в случае использования традиционной схемы, но при этом практически в два раза больше тепловой мощности шлаковой ванны генерируется и используется для расплавления присадочного материала. Расчеты теплового баланса на границе шлака и композиционной проволоки показывают (рис. 2), что с повышением производительности наплавки необходимое для качественного

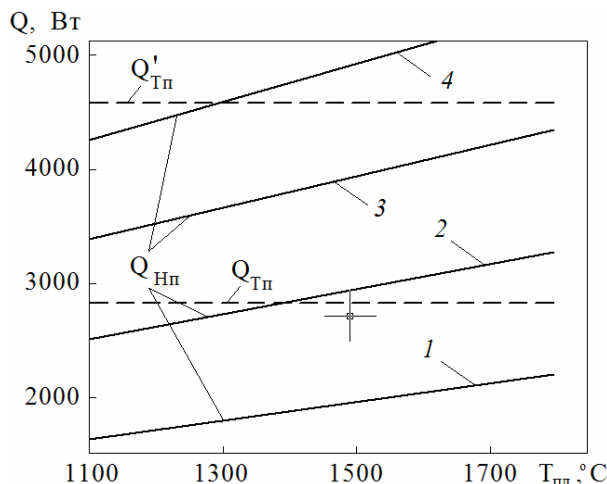


Рис. 2. Тепловой баланс процесса расплавления композиционной проволоки:

1, 2, 3, 4 – производительность наплавки  $G_n$ : 2 г/с, 3 г/с, 4 г/с, 5 г/с;  $Q_{Нп}$  – необходимая для расплавления композиционной проволоки тепловая мощность;  $Q_{Тп}$  и  $Q'_{Тп}$  – тепловая мощность, передаваемая шлаковой ванной в композиционную проволоку и поступающая в проволоку при включении контура "полюс электрод-шлак-изделие"

расплавления проволоки равенство тепловых мощностей  $Q_{Нп}$  и  $Q'_{Тп}$  будет выполняться, если соотношение  $Q_{Нп}/G_n$  будет находиться в пределах 0,9–1,1 кВт·с/г.

**Вывод.** Из анализа теплового баланса следует, что в процессе ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе с полым электродом поступление тепловой мощности от шлаковой ванны в электронейтральную композиционную проволоку происходит преимущественно за счет тепла, выделяющегося в контуре "полюс электрод-шлак-изделие".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зорин, И. В. Электрошлаковая наплавка торцевых поверхностей изделий с использованием двухконтурной схемы питания шлаковой ванны / И. В. Зорин, Г. Н. Соколов, А. А. Артемьев, В. И. Лысак // Автоматическая сварка. – 2008. – № 1. – С. 12–16.
2. Ксендзык, Г. В. Особенности тепловой работы токоподводящего кристаллизатора при электрошлаковой наплавке зернистым присадочным материалом / Г. В. Ксендзык // Промышленная теплотехника. – 1982. – № 2. – С. 45–50.
3. Соколов, Г. Н. Влияние режима электрошлаковой наплавки на термокинетические процессы получения легированного сплава на основе алюминидов  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al / Г. Н. Соколов, И. В. Зорин, В. И. Лысак, В. Н. Арисова // Вопросы материаловедения. – 2006. – № 3. – С. 41–52.