



УДК 669.117.56

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ В ШЛАКОВОЙ ВАННЕ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ЛИТЬЕ С ПРИПЛАВЛЕНИЕМ ФЛАНЦЕВЫХ ЗАДВИЖЕК

А. Ф. Мужиченко, М. А. Полещук, В. Л. Шевцов

Путем математического моделирования получено распределение объемных источников теплоты в шлаковой ванне при электрошлаковом литье с приплавом. Задача рассмотрена в трехмерной постановке. Определены граничные условия. Достигнуто хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений электрического тока, проходящего через приплавляемые элементы.

Using mathematic modeling, the distribution of volume heat sources in slag pool at electroslag casting with melting-on is obtained. The task is considered in three-dimensional version. Boundary conditions are determined. Good correlation of experimental and calculation values of electric current passed through the elements being melted-on is achieved.

Ключевые слова: тепловыделение в шлаковой ванне; математическое моделирование; трехмерная постановка; граничные условия; сравнение экспериментальных и расчетных данных

Задвижки с фланцами на концах патрубков применяют при добыче нефти и природного газа фонтанным способом. На многих украинских месторождениях они работают при давлении добываемого продукта до 70 МПа. В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработали технологию изготовления заготовок корпусов таких задвижек способом электрошлакового литья с приплавом (ЭШЛП), предусматривающим электрошлаковую выплавку только центральной части корпуса задвижки с одновременным приплавом к ней предварительно изготовленных патрубков с фланцами [1, 2].

Процесс ЭШЛП протекает в три стадии (рис. 1). Первая (рис. 1, а) и третья (рис. 1, в) представляют собой электрошлаковое литье цилиндрического слитка сплошного сечения по монофилярной схеме. Собственно процесс приплавки патрубков происходит на второй стадии (рис. 1, б). На этой стадии по мере плавления расходуемого электрода шлаковая и металлическая ванны перемещаются вверх вдоль торцов патрубков. Происходит их приплавление к литой части заготовки.

При разработке технологии ЭШЛП основное внимание уделяли качественному приплавлению патрубков без трещин и несплавов и получению в зонах приплавки требуемых свойств металла [3]. Особенностью ЭШЛП является то, что на стадии приплавки в шлаковой ванне появляются

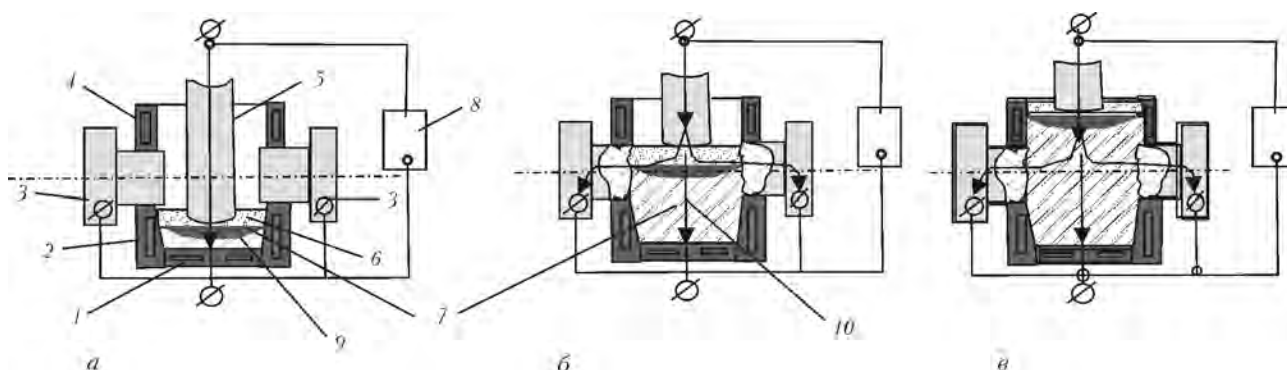


Рис. 1. Схема процесса ЭШЛП фланцевых задвижек: а – начальная; б – стадия приплавки; в – завершающая; 1 – поддон; 2 – кристаллизатор (нижняя часть); 3 – патрубки с фланцами; 4 – кристаллизатор (верхняя часть); 5 – расходуемый электрод; 6, 7 – соответственно шлаковая и металлическая ванны; 8 – источник питания; 9 – выплавленная часть заготовки

© А. Ф. МУЖИЧЕНКО, М. А. ПОЛЕЩУК, В. Л. ШЕВЦОВ, 2010

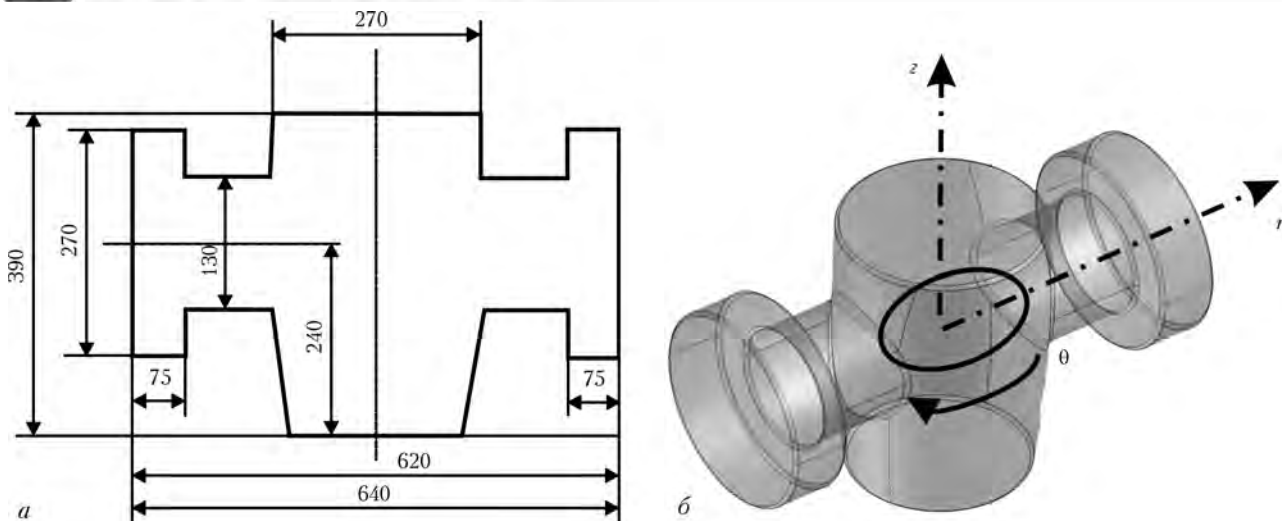


Рис. 2. Заготовка корпуса фланцевой задвижки с условным проходом 80 мм: а — эскиз; б — изометрия

дополнительные пути прохождения тока от расходуемого электрода к патрубкам (рис. 1, б), что влияет на распределение теплоты в шлаке, а значит, и на качество приплавления.

Исследование особенностей тепловыделения в шлаковой ванне проведено нами с помощью математического моделирования. Подобные задачи рассматривали многие исследователи с первых лет применения математических методов моделирования для изучения электрошлаковых процессов [4–7]. Однако все они были двумерными осесимметричными или сводились к ним. В то же время рассматриваемая нами задача в области приплавления патрубков становится трехмерной.

Заготовка корпуса фланцевой задвижки представляет собой сложную пространственную фигуру (рис. 2). Задачу о распределении плотности тепловыделения в шлаковой ванне при ЭШЛП заготовок такого типа решали в цилиндрической системе координат (z, r, θ) с началом, расположенным на пересечении продольных осей корпуса и патрубков. Заготовка имеет две плоскости симметрии: при $\theta = 0$ и 180° (Γ_{C_1} — вдоль оси патрубка) и $\theta = 90$ и 270° (Γ_{C_2} — поперек оси патрубка). Поэтому математическое моделирование процессов проводим только в одной четверти заготовки.

Математическая модель электрических и тепловых процессов в шлаковой ванне при ЭШЛП состоит из решения следующих задач:

построения трехмерной конечно-элементной модели плавильного пространства. Для этого геометрическую модель заготовки втягиваем в нашу расчетную программу в трехмерном формате IGS из конструкторской программы Autocad. Этот формат позволяет передать как объемы заготовки и шлаковой ванны, так и ограничивающие их поверхности, линии и ключевые точки. При решении поставленной задачи мы можем подробно рассматривать только центральную часть заготовки, ограниченную плавильным пространством кристаллизатора с обращенными внутрь его торцами приплавляемых

патрубков. Остальные части будем рассматривать с меньшей детализацией;

расчета полей электрического потенциала и плотностей токов в шлаковой ванне в трехмерной постановке;

расчета распределения удельных объемных источников теплоты в шлаковой ванне в трехмерной постановке.

Кроме того, для проверки адекватности реальному процессу разработанной модели проведен расчет интегральных значений токов на границах патрубков, расходуемого электрода и металлической ванны для различных моментов ЭШЛП. Расчетные значения токов сравнивали с экспериментальными данными, полученными в соответствующий момент ЭШЛП.

Для расчета плотностей токов в шлаковой ванне нами использована модель электрических процессов, сформулированная в виде поля потенциалов [6, 8]:

$$\text{div}(\sigma \text{ grad } \varphi) = 0. \quad (1)$$

По результатам расчетов плотностей токов определяем объемную плотность источников теплоты, выделяемой в шлаковой ванне:

$$q = \sigma |\text{ grad } \varphi|^2, \quad (2)$$

где $\sigma = \sigma(t)$ — удельная электропроводность шлака, зависящая от температуры величина, обратная удельному электрическому сопротивлению, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{мм}^{-1}$; φ — потенциал электрического поля, В.

Значение изменения удельного электрического сопротивления шлака АНФ-6 в интервале температур 1200... 1600 °С заимствовано из работ [7, 8]. В качестве начальных условий нами использованы результаты распределения температуры в шлаковой ванне, полученные в работе [9].

Решение уравнений (1) и (2) будем искать в области шлаковой ванны, ограниченной сверху торцом расходуемого электрода Γ_E и свободной поверхностью шлаковой ванны Γ_{III} ; снизу — зеркалом расплавленного металла Γ_M ; с боков — стенкой кри-

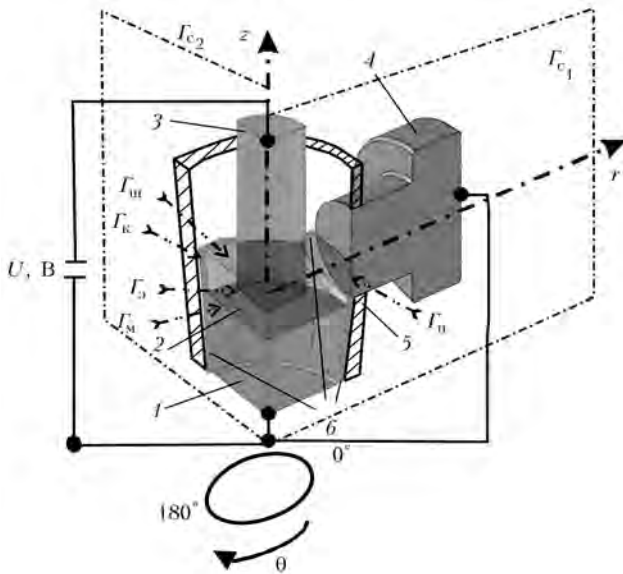


Рис. 3. Схема граничных условий, принятых при решении задачи: 1 – выплавленная часть заготовки; 2 – шлаковая ванна; 3 – расходующий электрод; 4 – приплавляемый патрубок; 5 – кристаллизатор; 6 – гарнисаж

таллизатора, покрытой гарнисажем Γ_K и оплавляемым торцом патрубка Γ_{II} , а также двумя плоскостями симметрии (Γ_{C_1} и Γ_{C_2} – соответственно вдоль и поперек оси патрубка) (рис. 3).

Задачу решаем в квазистационарной постановке для различных положений зеркала металлической ванны относительно продольной оси приплавляемого патрубка. Граничные условия представлены в таблице.

Геометрическая модель разбивается на сетку конечных элементов. Наибольший градиент изменения потенциала в шлаковой ванне имеет место в подэлектродной области, поэтому сетка у торцов электрода и патрубков назначается в несколько раз гуще [5, 6].

С целью проверки правильности задания граничных условий и принятых допущений проведена опытная выплавка заготовки корпуса задвижки с условным проходом 80 мм. С помощью многоканального самописца и трансформаторов тока, установленных в соответствующих цепях, непрерывно регистрировали значение тока, протекающего через расходующий электрод, выплавляемую заготовку и приплавляемые патрубки в течение всей плавки. При этом значения тока расходующего электрода и напряжения источника питания поддерживали постоянными (соответственно 3,2 кА и 57 В) при глубине ванны шлака АНФ-6, равной 75 мм. Положение зеркала металлической ванны относительно поддона определяли расчетным путем по времени сплавления меток на расходующем электроде.

Результаты измерений приведены на рис. 4 в виде кривых. Здесь же указаны значения тока, проходящего через эти элементы, полученные расчетным путем с помощью математической модели на различных уровнях зеркала металлической ванны.

На рис. 4 зафиксирована хорошая корреляция между расчетными и экспериментальными данными. Это подтверждает соответствие разработанной математической модели распределения объемных

Граничные условия для расчета распределения объемных источников теплоты

Обозначение границы	Параметры на границе		
	$\varphi, В$	$\sigma, Ом^{-1} \cdot мм^{-1}$	$T_c, ^\circ C$
$\Gamma_{Э}$	$\varphi = U$	$\sigma_M(T)$	1510
$\Gamma_{Ш}$	$\frac{\partial \varphi}{\partial Y} = 0$	$\sigma_{Ш}(T)$	1600
$\Gamma_{М}$	$\varphi = U_0$	$\sigma_M(T)$	1550
$\Gamma_{К}$		$\sigma = \infty$	1200
$\Gamma_{П}$	$\varphi = U_0$	$\sigma_M(T)$	1510
$\Gamma_{C_1}, \Gamma_{C_2}$	$\frac{\partial I}{\partial n} = 0$	$\sigma_M(T)$	$T_{Ш}$
	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	$\sigma_{Ш}(T)$	T_M

Примечание. Здесь $\sigma_M, \sigma_{Ш}$ – удельные проводимости соответственно металла и шлака; $T_M, T_{Ш}$ – температуры соответственно металла и шлака; n – нормаль к плоскостям симметрии.

источников теплоты в шлаковой ванне реальному процессу при ЭШЛП.

На рис. 5 приведено распределение плотностей тока и объемной плотности источников теплоты в шлаковой ванне в различные моменты процесса ЭШЛП заготовок корпусов фланцевых задвижек с условным проходом 80 мм. При расчете глубина ванны шлака (АНФ-6) равнялась 75 мм, диаметр расходующего электрода – 130 мм, диаметр приплавляемых патрубков – 160 мм, рабочий ток – 3,2 кА, напряжение на расходующем электроде $U = 40 В$,

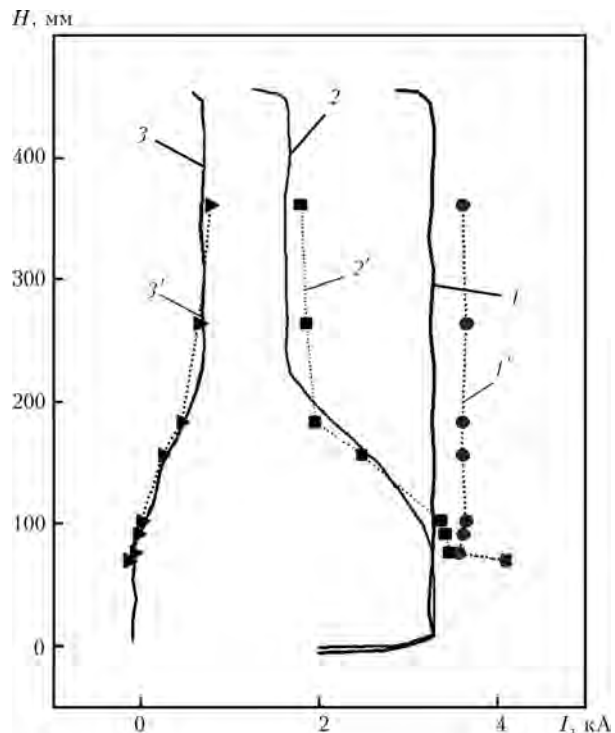


Рис. 4. Распределение значений тока и в зависимости от высоты заготовки корпуса задвижки H : 1 – ток расходующего электрода (1' – расчет); 2 – ток поддона (2' – расчет); 3 – патрубок (3' – расчет)

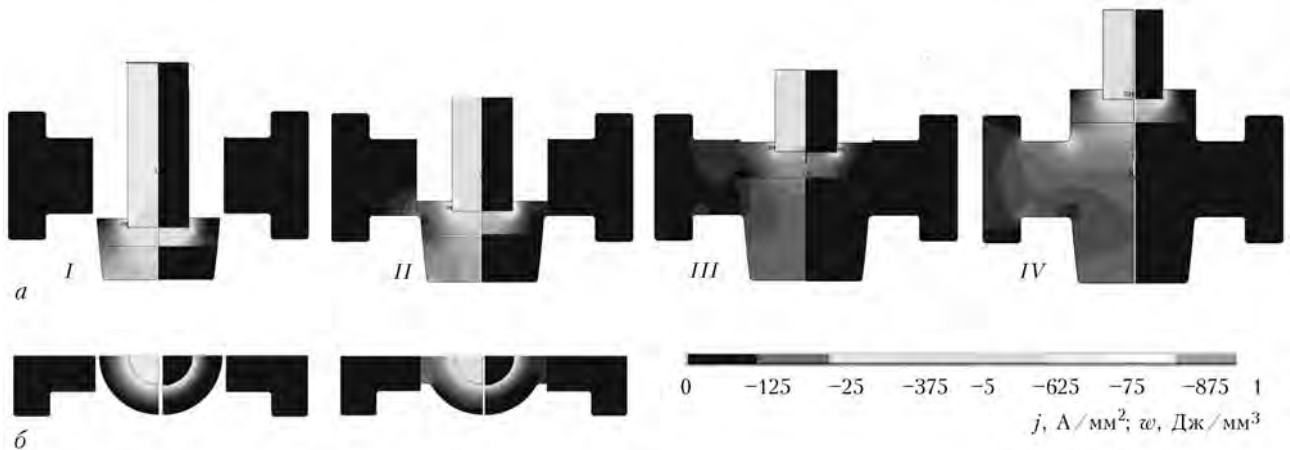


Рис. 5. Распределение плотности токов j (а) и плотности источников теплоты w в сечении по плоскости Γ_C и на поверхности шлаковой ванны (б) при различных расстояниях зеркала металлической ванны от оси патрубка: I — 170; II — 80; III — 0; IV — 120 мм

напряжение на зеркале металлической ванны и торце патрубка принято равным $U_0 = 0$.

Распределение тока и объемных источников теплоты определяли при четырех различных положениях зеркала металлической ванны относительно оси патрубка.

Распределение плотностей тока соответствует шкале (а), а плотностей объемных источников теплоты — шкале (б).

Как видно из рис. 5, пока уровень шлака не дошел до патрубка (положение I), распределение тока и объемных источников теплоты аналогично таковым при выплавке цилиндрического слитка [4, 5]. Картина токораспределения и выделения теплоты в объеме шлака существенным образом изменяется после достижения уровнем шлаковой ванны торца приплавляемого патрубка (положение II). Вблизи торца патрубка появляется новая зона интенсивного тепловыделения, отличающаяся от зоны у стенки кристаллизатора. Размещение новой зоны тепловыделения хорошо видно на рис. 5. Картина тепловыделения становится похожей на таковую при бифилярной плавке [6]. В шлаковой ванне как бы появляется дополнительный квазирасходуемый электрод. Когда зеркало металлической ванны достигает торца приплавляемого патрубка, интенсивность дополнительных источников теплоты в шлаке снижается (положение III), после окончания процесса приплавления (положение IV) картина токораспределения и выделения тепла становится аналогичной положению I.

Таким образом, из рис. 5 видно, что если патрубки электрически соединить при помощи проводников с поддоном, то в шлаковой ванне вблизи патрубков появляется зона интенсивного тепловыделения, благодаря чему торец патрубка более интенсивно прогревается, оплавляется и образует качественное соединение с выплавляемой частью заготовки.

Выводы

1. В результате проведенной работы создана трехмерная математическая модель распределения то-

ков и объемных источников теплоты в шлаковой ванне при ЭШЛП.

2. Показана ее адекватность экспериментальным данным.

3. Модель можно использовать при выборе технологических параметров выплавки заготовок корпусов задвижек различных типоразмеров до проведения плавки.

1. *Электрошлаковое* литье заготовок корпусов фланцевых задвижек с приплавлением патрубков // М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 2. — С. 13–17.
2. *Полещук М. А., Пузрин Л. Г., Шевцов В. Л.* Электрошлаковое литье — самый прогрессивный способ производства корпусов арматуры высокого давления // Арматуростроение. — 2009. — № 4. — С. 49–54.
3. *Исследование* области соединения в заготовках корпусов фланцевых задвижек высокого давления, полученных способом ЭШЛ с приплавлением // М. А. Полещук, Т. Г. Соломийчук, Г. М. Григоренко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 4. — С. 8–12.
4. *Заполнение* шлаком и металлом охлаждаемых кристаллизаторов при электрошлаковом литье изделий сложной формы // В. Л. Шевцов, И. И. Кумьш, Г. С. Маринский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1975. — № 2. — С. 26–31.
5. *Определение* интенсивности источников тепла при ведении электрошлакового процесса неплавящимся электродом ЭШП // А. М. Макара, Н. А. Мосендз, Н. И. Тарасевич и др. // Там же. — 1975. — № 2. — С. 6–10.
6. *Оценка* интенсивности джоулевых источников тепла в шлаковой ванне при ЭШП по бифилярной схеме // Б. И. Медовар, В. Л. Шевцов, В. И. Саган и др. // Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 43–54.
7. *Математическое* моделирование процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов способом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токопроводящем кристаллизаторе // В. И. Махненко, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 4. — С. 30–37.
8. *Eric R. H.* Slag properties and design issues pertinent to matte smelting electric furnaces // VII Intern. conf. on molten slags fluxes and salts (Cape Town January, 25–28, 2004). — Cape Town, 2004. — P. 531–541. (The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004).
9. *Hara S., Hashimoto H., Ocino K.* Electrical conductivity of molten slags for electro-slag remelting // Transaction ISIJ. — 1983. — Vol. 23. — P. 1053–1058.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 15.04.2010