



УДК 669.187:621.3.072.001.57

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ШЛАКОМ И МЕТАЛЛОМ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ОБОГРЕВА

Ф. К. Биктагиров, И. В. Крикент

На математических моделях применительно к электрошлаковому процессу с нерасходуемыми электродами изучены закономерности тепловыделения и массопереноса в шлаковой ванне при различных схемах токоподвода. Показано, что для улучшения теплопередачи от шлака к металлу при бифилярной схеме токоподвода, равно как и при трехфазной, необходимо соблюдение определенных геометрических пропорций расположения электродов в шлаковом расплаве. Экспериментальные исследования теплового баланса при электрошлаковом обогреве металла подтвердили расчетные выкладки.

Laws of heat generation and mass transfer in slag pool at different diagrams of current supply were studied on the mathematical models relative to the non-consumable electroslag process. It is shown that to improve the heat transfer from slag to metal at bifilar diagram of current supply, as well as at three-phase diagram, it is necessary to keep certain geometric proportions of arrangement of electrodes in the slag melt. Experimental investigations of heat balance in electroslag heating of metal confirmed the calculated results.

Ключевые слова: электрошлаковый обогрев; тепловыделение; массоперенос; математическое моделирование; тепловой баланс

В различных технологических процессах, связанных с использованием шлакового расплава как средства нагрева металла, одной из основных характеристик, которая во многом определяет технико-экономические показатели той или иной технологии, является интенсивность теплообмена между контактирующими фазами. В полной мере это относится к технологиям получения стальных слитков с использованием электрошлакового обогрева для предупреждения усадочных дефектов. При разработке конкретной технологии электрошлакового обогрева с целью уменьшения энергозатрат необходимо оценивать влияние различных его параметров на интенсивность нагрева находящегося под слоем шлака металла. Ранее были изучены некоторые закономерности теплопередачи от перегретого шлака к металлу. Выявлено, что коэффициент теплоотдачи шлак–металл зависит от состава используемого шлака и обрабатываемого металла, выделяемой в шлаковой ванне удельной мощности, а также ряда других факторов [1, 2]. Немаловажное значение при этом имеют и конструктивно-технологические особенности электрошлаковых установок, в частности, электрическая схема питания.

Наиболее изучены условия теплообмена между шлаком и металлом при однофазной прямой схеме токоподвода, когда электрическая цепь замыкается от электрода через шлак к металлу. В то же время для уменьшения реактивности короткой сети электрошлаковых печей и увеличения коэффициента использования мощности более предпочтительны бифилярная и трехфазная схемы питания с распо-

ложением токоподводящих электродов в вершинах равностороннего треугольника в последнем случае. Однако тогда условия тепловыделения в шлаковом расплаве будут отличаться от таковых при однофазной прямой (электрод–поддон) схеме подвода тока к шлаку. Наши исследования были проведены с целью уточнения особенностей тепловых процессов при однофазной, бифилярной и трехфазной схемах питания применительно к условиям электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами.

Первоначально с использованием ранее разработанных математических моделей [3, 4] был выполнен анализ тепловыделения и массопереноса в шлаковой ванне. На рис. 1 приведены результаты расчета выделения джоулевого тепла в объеме шлаковой ванны при монофилярной и двухэлектродной (расщепленной) прямой схемах (электрод–поддон), а также бифилярной (электрод–электрод) схеме токоподвода в случае, когда под слоем шлакового расплава располагается токопроводящая подложка (металл). При выполнении этих расчетов подводимая к шлаковой ванне мощность составляла около 80 кВт, электропроводность шлака принималась равной $2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, геометрические параметры (размер шлаковой ванны, диаметр электродов и т. д.) видны на рисунке.

Как следует из полученных данных, выделение энергии в шлаковой ванне происходит крайне неравномерно. Плотность источников теплоты при прямой схеме наибольшая под электродами (рис. 1, а, б), а при бифилярной (рис. 1, в) — возле электродов и между ними, что связано с преимущественным протеканием тока в направлении электрод–металл в первом случае и электрод–электрод во втором.

© Ф. К. БИКТАГИРОВ, И. В. КРИКЕНТ, 2004

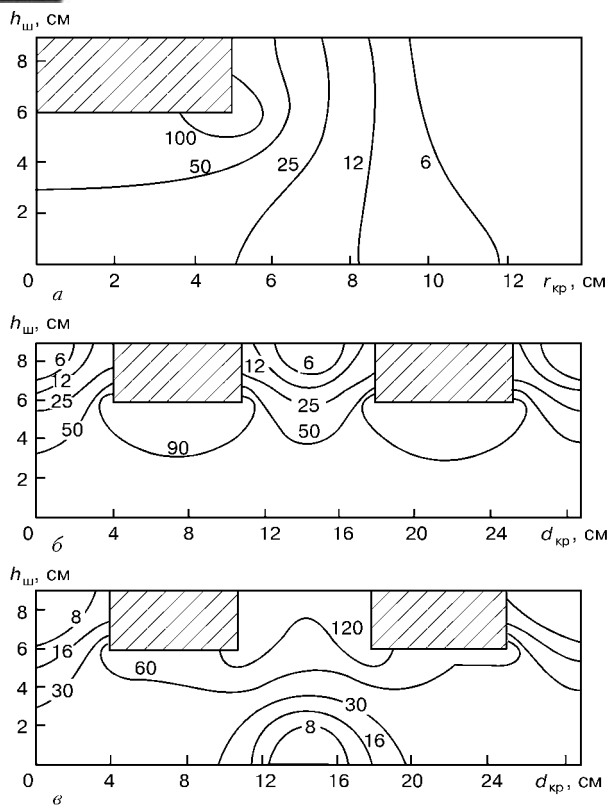


Рис. 1. Плотность источников теплоты ($\text{Вт}/\text{см}^3$) при однофазной прямой (а), б) и бифилярной (в) схемах токоподвода

Несмотря на такую неравномерность выделения теплоты, температура в шлаковой ванне практически выравнивается вследствие активного перемешивания шлакового расплава под влиянием термогравитационных и электромагнитных сил. Причем, действие последних обычно преобладает, и они главным образом определяют направление и интенсивность шлаковых потоков.

При электрошлаковом обогреве по прямой схеме во многих случаях можно считать, что электромагнитное поле в шлаковой ванне является осесимметричным. Тогда плотность электромагнитной силы \vec{F} можно представить в виде

$$\vec{F} = -\frac{\mu}{2} \left(\frac{2}{r} H_\epsilon^2 \vec{e}_r + \text{grad } H_\epsilon^2 \right), \quad (1)$$

где μ — магнитная проницаемость шлака; H_ϵ — азимутальная составляющая вектора напряженности магнитного поля; \vec{e}_r — единичный вектор, направленный вдоль радиальной координаты r .

В соответствии с теоремой Гельмгольца любое векторное поле \vec{A} можно представить в виде суммы двух составляющих — потенциальной и вихревой, т. е.

$$\vec{A} = \text{grad } \Pi + \text{rot } \vec{B}, \quad (2)$$

где Π — некая скалярная функция (потенциал).

Как следует из (1), в качестве этого потенциала выступает H_ϵ , а вихревая составляющая представляется в виде центростремительного вектора, прямо пропорционального квадрату напряженности магнитного поля и обратно пропорционального радиусу.

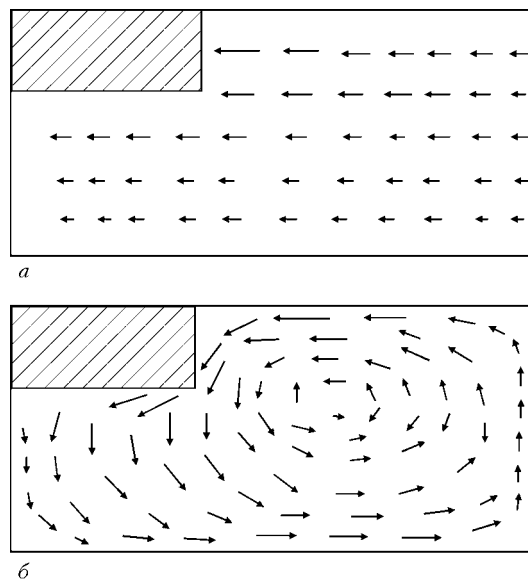


Рис. 2. Направление действия ротационной составляющей электромагнитной силы (а) и характер вызванных ею шлаковых потоков (б)

Известно, что потенциальная составляющая вектора плотности силы не оказывает влияния на гидродинамику жидкости и ее воздействие ограничивается созданием магнитоэстатического давления, сложным образом распределенного по объему расплава. Поэтому в осесимметричном электромагнитном поле электромагнитное перемешивание расплава осуществляется лишь под действием ротационной составляющей электромагнитной силы, которая имеет центростремительный характер.

На рис. 2, а показана рассчитанная на математической модели картина векторного поля $\vec{F}_{\text{rot}} = -\mu H_\epsilon^2 \vec{e}_r / r$ в шлаковой ванне при ведении процесса по прямой схеме питания, а течение расплава, вызванное этой вихревой составляющей электромагнитной силы, показано на рис. 2, б.

В результате такого характера перемешивания расплава перегретый шлак транспортируется в подэлектродной зоне по направлению к обогреваемому металлу. Здесь шлаковые потоки поворачиваются к периферии шлаковой ванны, у стенки формы поднимаются вверх к поверхности шлака, а затем опускаются вдоль боковой поверхности электрода. На гидродинамику шлака оказывает влияние также тепловая конвекция, которая пытается организовать вихревое течение в направлении, обратном представленному на рис. 2, б. Однако в любом случае электромагнитная сила превосходит архимедову и благоприятное с точки зрения обогрева металла течение жидкого шлака сохраняется.

Выполненные расчеты также показывают, что электромагнитное поле в шлаковой ванне является плоскопараллельным при ведении электрошлакового процесса по однофазной прямой схеме двумя широкими пластинчатыми электродами, за исключением близлежащих к узким граням областей. В этом случае вектор \vec{F} имеет только потенциальную составляющую и движение шлака под действием электромагнитной силы возможно лишь вблизи узких граней электродов, где электромагнитное поле перестает быть плоскопараллельным. Тут движение

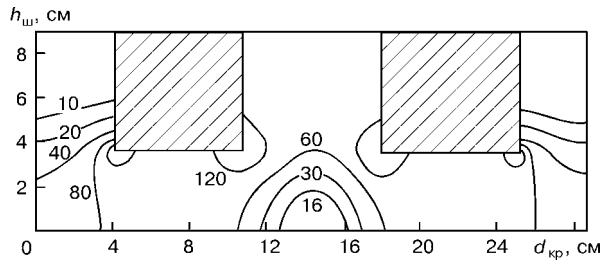


Рис. 3. Плотность источников теплоты ($Вт/см^3$) при бифилярной схеме токоподвода при изменении глубины погружения электродов

шлакового расплава будет происходить преимущественно под действием термогравитационных сил, что необходимо иметь в виду при осуществлении такого рода электрошлакового процесса.

При бифилярном подсоединении электродов движение шлака приобретает другой, отличный от прямой схемы, характер. Так, согласно исследованиям на физических моделях [5] при сравнительно небольшом погружении электродов в шлаковый расплав наиболее интенсивное движение шлака происходит в верхней части шлаковой ванны, а в нижней ее части вблизи границы с металлом шлаковые потоки значительно слабее.

Описанное отличие в тепловыделении и массопереносе в шлаковой ванне при подключении электродов к источнику питания по различным схемам должно отражаться и на теплообмене между контактирующими фазами. При прямой схеме токоподвода условия теплопередачи от шлака к металлу более благоприятны, чем при бифилярной. Связано это как с большей плотностью источника теплоты вблизи границы раздела шлак–металл (в представленном примере $90 \text{ Вт}/\text{см}^3$ против 60), так и более интенсивным здесь движением шлакового расплава. Последнее немаловажно, т. к. для процессов теплопередачи между жидкостью и твердым телом (в нашем случае между шлаковым расплавом и находящимся под ним металлом) очень большое значение имеет режим движения жидкости. От этого зависит толщина переходного слоя на границе с твердой поверхностью и термическое сопротивление теплоотдаче.

Для улучшения условий нагрева шлаком металла, когда последний непосредственно не подсоединен к источнику питания, необходимо в первую очередь приблизить зону максимального тепловыделения к границе шлак–металл. Согласно модельным экспериментам (рис. 3) для этого при межэлектродном промежутке, равном диаметру электродов, расстояние от нижнего торца электродов до металла должно составлять не более половины диаметра этих электродов. При таких условиях, как следует из данных физического моделирования при бифилярной схеме токоподвода [5], изменяется также характер шлаковых потоков. Значительная их часть оказывается направленной от подэлектродных областей вниз в сторону границы с металлом, что приводит к усилению здесь движения шлака и должно способствовать интенсификации теплообменных процессов.

Что касается трехфазной схемы питания электрошлаковых установок, то в этом случае, как и при бифилярной схеме, токовые цепи могут замыкаться между электродами. Поэтому характер тепловыде-

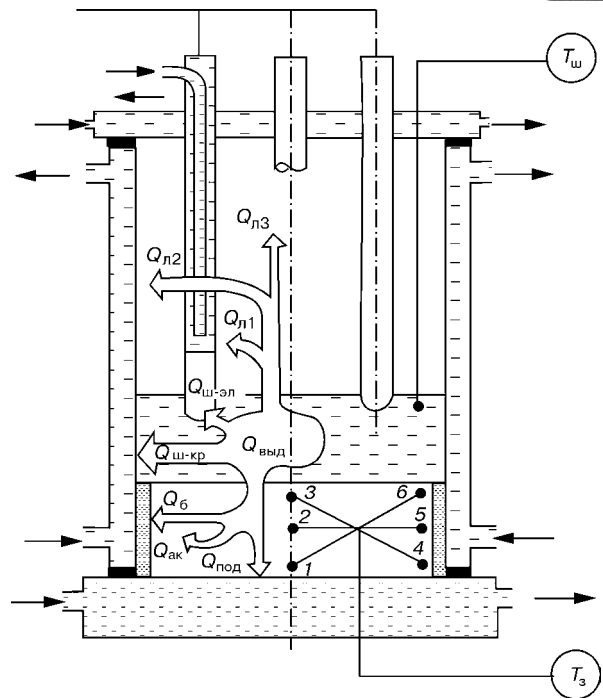


Рис. 4. Схема измерения теплофизических параметров и распределения подводимой к шлаковой ванне мощности (обозначения см. в тексте)

ления в шлаковой ванне и движение шлакового расплава при трехфазной схеме по своей сути ближе к наблюдаемому при бифилярной схеме, а не при однофазной прямой.

Необходимо отметить, что тепловое состояние шлаковой ванны при электрошлаковом процессе с нерасходуемыми электродами определяется многими факторами. Основными из них являются геометрические размеры шлаковой ванны, диаметр электродов и расстояние между ними, физические свойства шлака, наличие электрического сопротивления на границе шлака с металлом и с формой и его параметры. Математическая модель учитывает не только эти факторы, но даже такой показатель, как форма нижнего конца электрода, т. е. плоский, конусообразный или в виде полусферы. Поэтому в каждом конкретном случае с учетом заданных условий можно оценить такие показатели, как плотность источника теплоты, направление протекания тока и его значение, падение напряжения на отдельных участках, направление действия электромагнитных сил. Эти данные необходимы для правильного выбора как конструктивных, так и технологических параметров процесса и пути их оптимизации.

Общие выводы о влиянии схемы токоподвода на тепловыделение и теплопередачу при электрошлаковом обогреве, сделанные по данным моделирования, нашли экспериментальное подтверждение, в частности, при исследовании теплового баланса шлаковой ванны при электрошлаковом процессе с нерасходуемыми электродами.

Эксперименты проводили следующим образом. Водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 280 мм был установлен на водоохлаждаемый поддон (рис. 4). Между кристаллизатором и поддоном укладывали теплоизоляционную прокладку. На поддон устанавливали стальную заготовку (затравку) с вмонтированными в нее для измерения тем-



пературы термopарми 1–6. Зазор между затравкой и внутренней стенкой кристаллизатора заполняли шлаком мелкой фракции. Сверху кристаллизатор закрывается водоохлаждаемой крышкой. Электрошлаковый процесс осуществляется с помощью трех водоохлаждаемых электродов с графитовыми наконечниками диаметром 75 мм. Диаметр распада электродов — 140 мм. В экспериментах использовали шлак АНФ-32. Глубина шлаковой ванны составляла 90 мм. Источник питания — трансформатор ТШС-3000/3, который может переключаться по низкой стороне на однофазный и трехфазный ток. При однофазной схеме токоподвода все три электрода подключали по прямой схеме электрод-поддон, т. е. они были подсоединены к одному из полюсов трансформатора, а другой полюс — к поддону. В процессе экспериментов периодически измеряли температуру на поверхности шлаковой ванны и на расстоянии 5 мм от металлической затравки.

Выделяемая в шлаковой ванне тепловая энергия распределяется в плавильном пространстве следующим образом (см. рис. 4):

$$Q_{\text{выд}} = Q_{\text{ш-м}} + Q_{\text{ш-кр}} + Q_{\text{л}} + Q_{\text{ш-эл}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{выд}}$ — теплота, выделяемая в шлаке; $Q_{\text{ш-м}}$, $Q_{\text{ш-эл}}$ — соответственно тепловой поток от шлаковой ванны к металлу (затравке) и электродам; $Q_{\text{ш-кр}}$ — тепловой поток через боковую поверхность шлаковой ванны к кристаллизатору; $Q_{\text{л}}$ — суммарные потери тепла на излучение от зеркала шлаковой ванны.

Потери теплоты на излучение можно оценить по известному выражению Стефана–Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \epsilon \sigma_0 F (T_{\text{ш}} + 273)^4. \quad (4)$$

Здесь ϵ — степень черноты излучаемого тела (жидкого шлака); σ_0 — константа излучения абсолютно черного тела; F — площадь излучаемой поверхности; $T_{\text{ш}}$ — температура зеркала шлаковой ванны.

Потери теплоты от шлаковой ванны через электроды являются частью общего теплового потока $Q_{\text{эл}}$, отводимого охлаждающей электроды водой, т. е.

$$Q_{\text{эл}} = Q_{\text{ш-эл}} + Q_{\text{л1}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{л1}}$ — поток излучаемого тепла, поглощаемый поверхностью электродов.

В процессе экспериментов для оценки доли теплоты, излучаемой в электроды ($Q_{\text{л1}}$), кратковременно извлекали один из них из шлакового расп-

лава. Происходящее при этом изменение количества теплоты, отводимой охлаждающей электроды водой, которое определяется методом калориметрирования, позволяет рассчитать значение $Q_{\text{ш-эл}}$.

Тепловой поток от шлаковой ванны к стенке кристаллизатора находится из выражения

$$Q_{\text{ш-кр}} = Q_{\text{кр}} - Q_{\text{л2}} - Q_6, \quad (6)$$

где $Q_{\text{кр}}$ — тепловой поток, отводимый охлаждающей кристаллизатор водой; $Q_{\text{л2}}$ — тепловой поток, излучаемый к стенке кристаллизатора; Q_6 — тепловой поток к стенке кристаллизатора через боковую поверхность затравки.

Значение $Q_{\text{кр}}$ измеряется непосредственным калориметрированием, Q_6 рассчитывается с учетом температурного поля затравки и теплопроводности шлаковой засыпки, $Q_{\text{л2}}$ находится вычитанием излучаемого тепла на электроды $Q_{\text{л1}}$ и крышку $Q_{\text{л3}}$ из потерь тепла на излучение с поверхности шлаковой ванны $Q_{\text{л}}$.

Тепловой поток от шлаковой ванны к металлу (затравке) можно определить либо из выражения (3)

$$Q_{\text{ш-м1}} = Q_{\text{выд}} - Q_{\text{ш-кр}} - Q_{\text{л}} - Q_{\text{ш-эл}}, \quad (7)$$

либо суммируя статьи распределения поступающего в затравку теплового потока:

$$Q_{\text{ш-м2}} = Q_{\text{под}} + Q_{\text{ак}} + Q_6 + Q_{\text{п.л}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{под}}$ — тепловой поток, отводимый водой, охлаждающей поддон, и определяемый калориметрированием; $Q_{\text{ак}}$, $Q_{\text{п.л}}$ — количество теплоты, аккумулируемое затравкой (т. е. потраченное на нагрев металла) и поступившее на ее подплавление соответственно.

Теплота, поступившая на нагрев затравки, находится из выражения

$$Q_{\text{ак}} = m_3 c_m T_3, \quad (9)$$

где m_3 и T_3 — масса и средняя температура затравки; c_m — удельная теплоемкость металла.

Ввиду того, что масса подплавляемого металла в условиях проводившихся экспериментов была незначительной, расход теплоты на эту статью теплового баланса не учитывали.

Основные данные теплофизических замеров в процессе электрошлаковой обработки металла при различных схемах токоподвода приведены в табл. 1

Таблица 1. Данные теплофизических замеров при различных схемах токоподвода

Схема токоподвода	Подводимая мощность, кВт	Заглубление электродов в шлак, мм	Расход воды на охлаждение (кг/ч) / разность температур подводимой и отводимой воды (°С)						Температура шлака, °С	
			Кристаллизатор	Поддон	Крышка	Электроды			на поверхности	вблизи затравки
						1	2	3		
Однофазная	70	30	2322,4/16,5	165,4/21,1	324,7/8,5	260,1/15,8	272,3/14,1	244,9/15,6	1550	1540
	95	50	2571,2/20,8	418,4/15,8	372,6/10,4	266,3/18,7	263,4/17,5	234,8/20,1	1650	1680
Трехфазная	65	30	3003,4/11,7	71,9/26,0	289,3/12,8	421,2/11,3	373,5/11,7	225,1/18,3	1580	1535
	106	55	3668,5/16,2	316,7/21,5	320,4/15,2	488,9/12,1	451,7/12,0	230,3/21,7	1700	1690



и на рис. 5, результаты расчета отдельных статей теплового баланса сведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что в условиях проводившихся экспериментов при подводимой к шлаковой ванне мощности 65...70 кВт (средняя удельная мощность 13...14 кВт/дм³) доля теплоты, поступающая от шлакового расплава к металлу, при однофазной схеме токоподвода составляет около 16 % от общего тепловыделения в шлаке, а при трехфазной схеме намного меньше — около 9 %. Указанное отличие как раз и объясняется выявленными особенностями распределения тока в шлаковой ванне при различных схемах токоподвода и связанными с этим явлениями тепловыделения и теплопереноса. А именно, в экспериментах с трехфазной схемой токопод-

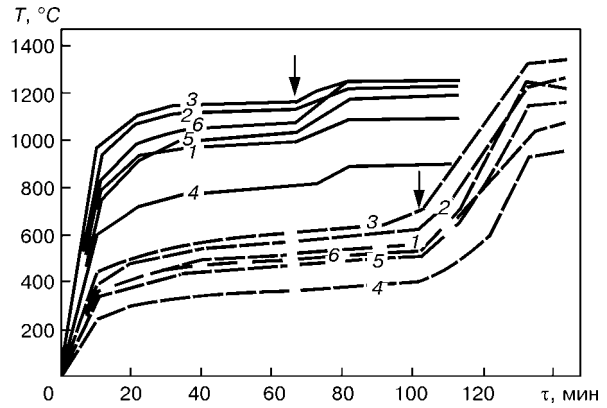


Рис. 5. Изменение температуры металла при электрошлаковом обогреве при однофазной (сплошные линии) и трехфазной (штриховые) схеме токоподвода: 1–6 — номера термопар (см. рис. 4); момент изменения мощности показан стрелками

Таблица 2. Расчет теплового баланса для электрошлакового обогрева при различных схемах токоподвода

Схема токоподвода	Составляющие теплового баланса											
	$Q_{\text{внд}}$	$Q_{\text{кр}}$	$Q_{\text{л1}}$	$Q_{\text{л2}}$	$Q_{\text{л3}}$	$Q_{\text{б}}$	$Q_{\text{ш-кр}}$	$Q_{\text{ш-эл}}$	$Q_{\text{под}}$	$Q_{\text{ак}}$	$Q_{\text{ш-м1}}$	$Q_{\text{ш-м2}}$
Однофазная	70	44,57	7	14,11	3,21	2,72	27,74	6,69	4,06	4,84	11,27	11,62
	100	63,67	10	20,16	4,59	3,89	39,63	9,56	5,80	6,91	16,10	16,60
	95	62,20	8,98	16,62	4,51	3,11	41,31	8,07	7,69	5,57	15,29	16,25
	100	65,47	9,45	17,49	4,75	3,27	43,48	8,49	8,09	5,86	16,09	17,11
Трехфазная	65	40,87	8,19	13,57	4,31	1,22	26,08	7,22	2,17	2,54	5,85	5,93
	100	62,88	12,60	20,88	6,63	1,88	40,12	11,11	3,34	3,91	9	9,12
	106	69,12	9,49	18,21	5,67	3,26	47,66	9,55	7,92	5,79	15,45	16,97
	100	65,21	8,95	17,18	5,35	3,08	44,96	9,01	7,47	5,46	14,58	16,01

Примечание. Значения составляющих даны в киловаттах (числитель) и процентах (знаменатель).

вода и заглублении электродов в шлак на 30 мм тепловыделение и шлаковые потоки вблизи затравки намного слабее по сравнению с наблюдаемыми при однофазной схеме в аналогичных условиях, что предопределяет различие в условиях теплоотдачи от шлака к металлу.

При изменении заглубления электродов в шлак, как и следовало ожидать, значения тепловых потоков от шлака к металлу при однофазной и трехфазной схемах токоподвода оказались соизмеримыми (см. табл. 2 и рис. 5). Причем, обращает на себя внимание тот факт, что в первом случае, когда направление шлаковых потоков принципиально не меняется, несмотря на повышение температуры шлака, доля теплоты, поступающей к металлу, остается на одном и том же уровне. Это является косвенным подтверждением того, что именно характер движения шлакового расплава вблизи границы с металлом оказывает значительное влияние на интенсивность теплообмена.

На основании полученных результатов, которые были подтверждены также дополнительными экспериментами, в том числе с изменением положения электродов в шлаковой ванне при неизменной подводимой к шлаку мощности, можно сделать следующий вывод. При однофазной прямой схеме токоподвода доля поступающей от шлака к металлу теплоты остается примерно на одном уровне при изме-

нении электрических параметров электрошлакового процесса. При трехфазной схеме токоподвода электрический режим и связанное с ним расположение электродов в шлаковой ванне оказывают существенное влияние на количество теплоты, поступающей к металлу. Следовательно, при использовании трехфазного источника питания необходимо учитывать отмеченные особенности теплообмена между шлаком и металлом для оптимального выбора технологических параметров электрошлакового нагрева и плавки металла.

1. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Под ред. Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1978. — 304 с.
2. *Лютый И. Ю., Латаш Ю. В.* Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов. — Киев: Наук. думка, 1982. — 188 с.
3. *Демченко В. Ф., Крикент И. В.* Математическое моделирование электромагнитных явлений при электрошлаковом процессе // Математическое моделирование. — 2002. — 18, № 1. — С. 16–20.
4. *Расчетная система для исследования токораспределения в шлаковой ванне* / В. И. Махненко, В. Ф. Демченко, Н. И. Тарасевич, И. В. Крикент // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 1. — С. 14–19.
5. *Роусон Дж. Д., Доусон Д. И., Кирхем Н.* Движение шлака и металла в процессе ЭШП // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1975. — Вып. 3. — С. 70–89.

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

Поступила 20.07.2004