



УДК 669.187.56.530.17

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ В СЛЯБОВОМ ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ. Часть 2. Наплавка

К. А. Цыкуленко, О. М. Вислобоков

Исследована гидродинамика шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе для процесса наплавки. Показано, что характер гидродинамических потоков в шлаковой ванне зависит от соотношения параметров наплавляемого слоя, расстояния между токоподводящей секцией и уровнем металлической ванны в кристаллизаторе. Изучено распределение тока как вдоль цепи электродов токоподводящей секции кристаллизатора, так и по всему объему шлаковой ванны.

Hydrodynamics of slag pool in a slab current-carrying mould for the process of cladding has been investigated. It is shown that the mode of hydrodynamic flows in a slag pool depends on ratio of parameters of the clad layer, distance between the current-carrying section and level of metal pool in the mould. The current distribution both along the circuit of electrodes of the current-carrying section of the mould and also across the whole volume of slag pool was studied.

Ключевые слова: слябовый токоподводящий кристаллизатор; схемы подключения; гидродинамические потоки в процессе наплавки; растекание тока

В продолжение работ по моделированию гидродинамики шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе, описанных в статье [1], исследованы гидродинамические потоки при наплавке. Для этого в используемой ранее модели на поддоне размещали стальные заготовки, сечение которых подбирали таким образом, чтобы между ними и всеми электродами токоподводящей секции оставался одинаковый зазор, соответствующий толщине наплавляемого слоя (7,5 или 17,5 мм). Стальные заготовки надежно фиксировали на поддоне на двух медных стержнях, обеспечивающих токоподвод. Для предотвращения возможности перекоса заготовки и обеспечения равномерности заданного зазора по периметру модели между электродами и стальными заготовками устанавливали деревянные распорки, размещая их только по самому верхнему краю токоподводящей секции, а уровень моделирующего шлаковую ванну насыщенного раствора хлористого кальция всегда располагался ниже (рис. 1).

При наплавке, как и при выплавке слитка в токоподводящем кристаллизаторе, наличие разрыва в токоподводящей секции приводит к формированию горизонтального потока, направленного от места подключения кабеля вдоль цепи электродов по периметру секции к разрыву. Однако в этом случае интенсивность вращения потока в зазоре между на-

плавляемой заготовкой и стенкой кристаллизатора, при всех прочих равных условиях, заметно ниже (в нашем случае примерно в два раза). Уменьшение зазора также приводит к снижению интенсивности вращения такого потока. Повысить ее можно только за счет увеличения тока в цепи электроды–поддон. Расположение поддона (расстояние до токоподводящей секции h) никак не отражается на интенсивности вращения и практически не изменяет ток в цепи электродов токоподводящей секции. Ось горизонтального потока размещена не по центру зазора, а ближе к поверхности токоподводящей секции (рис. 2).

Снижение интенсивности вращения, по-видимому, связано с концентрацией силовых линий магнитного поля в стальном сердечнике — наплавляемой заготовке. Чем меньше зазор (наплавляемого слоя), тем меньше силовых линий проходит через раствор, а следовательно, меньше напряженность магнитного поля H в зазоре (рис. 3). В результате сила, действующая на электрически заряженные частицы раствора, моделирующего шлаковую ванну, уменьшается, а интенсивность его вращения снижается.

Вертикальные потоки, зафиксированные при моделировании процесса выплавки слитка [1], в ходе наплавки существенно зависят от положения поддона. В условиях эксперимента при расстоянии от поддона до токоподводящей секции более 50 мм вертикальных потоков для любых схем подключения токоподводящей секции не обнаружено. Они появ-

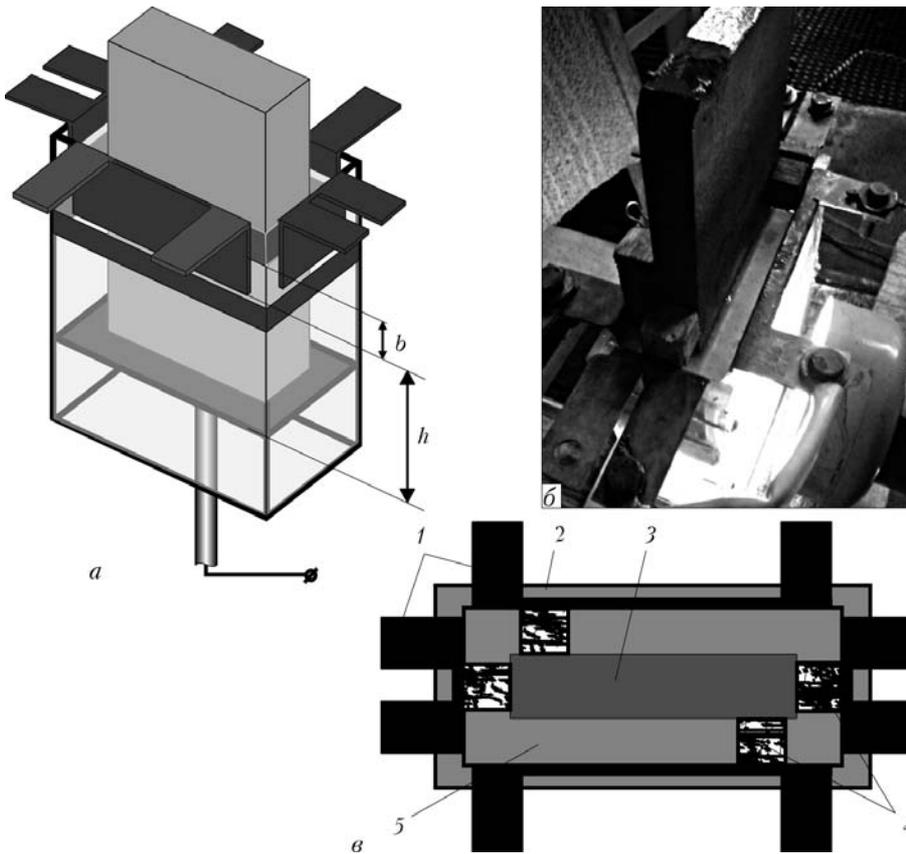


Рис. 1. Общий вид модели токоподводящего slabового кристаллизатора (а, б) и расположение распорок (в) для центрирования заготовки под наплавку: 1 – контакты электродов токоподводящей секции; 2 – корпус кристаллизатора; 3 – наплавляемая заготовка; 4 – деревянные распорки; 5 – моделирующая шлак жидкость в зазоре; b – глубина погружения электродов

ляются в случае приближения поддона к медной разделительной секции и наиболее заметны, когда расстояние до токоподводящей секции становится меньше, чем зазор между заготовкой и кристаллизатором. Так, для случая, когда зазор составлял 17,5 мм, а расстояние до токоподводящей секции рав-



Рис. 2. Вращение горизонтального потока при наплавке в токоподводящем кристаллизаторе (вид сверху): 1 – стенки корпуса кристаллизатора; 2 – электроды токоподводящей секции; 3 – поток моделирующего шлак раствора; 4 – зазор (17,5 мм); 5 – наплавляемая заготовка; 6 – деревянная распорка

нялось 12 мм, зафиксированы вертикальные потоки (рис. 4), которые формируются около электродов, направляются вниз вдоль стенок кристаллизатора к поддону, смещаются в соответствии со схемой подключения горизонтальным потоком и восходят к поверхности у граней наплавляемой заготовки (рис. 4, штриховые линии). При наличии одного разрыва в цепи электродов вертикальные потоки со стороны подключения кабеля имеют несколько большую протяженность. При двух разрывах в цепи электродов токоподводящей секции картина потоков симметрична (рис. 4, б).

Необходимо отметить, что формирование нисходящих потоков у электродов токоподводящей секции при наплавке происходит не на участке перехода от токоподводящей к средней (разделительной) секции у нижней границы электродов, как при моделировании процесса выплавки слитка, а на некотором расстоянии от поверхности раствора. Такое явление,

возможно, связано с изменением электрического сопротивления участка цепи токоподводящий электрод–поддон и сил свободной конвекции раствора.

При моделировании процесса выплавки слитка установлено, что зоной наибольшего тепловыделения является нижняя граница электродов токоподводящей секции. В ходе наплавки, когда сопротивление на участке цепи токоподводящий электрод–

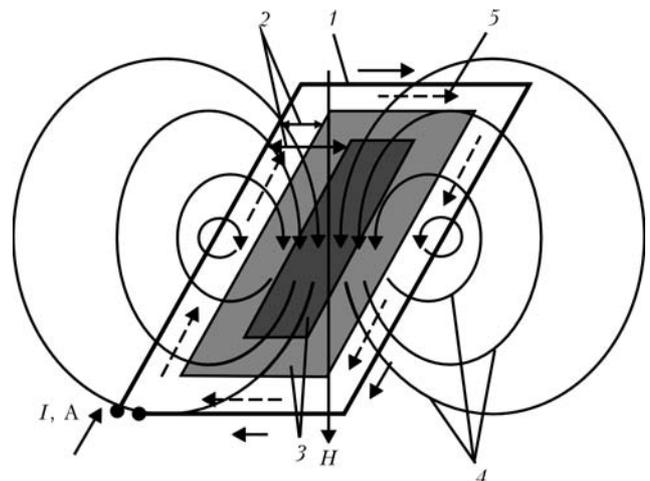


Рис. 3. Вращение моделирующего шлак раствора и концентрация части силовых линий магнитного поля в наплавляемых заготовках: 1 – токоподводящий контур; 2 – зазоры; 3 – наплавляемые заготовки; 4 – силовые линии магнитного поля; 5 – направление вращения раствора

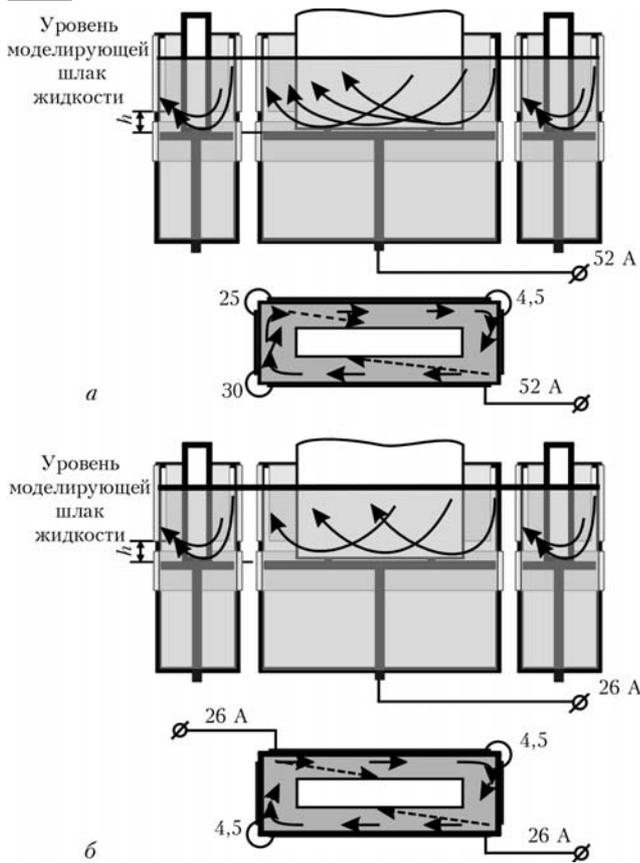


Рис. 4. Гидродинамические потоки моделирующей шлак жидкости при наплавке в плоском токоподводящем кристаллизаторе с одним (а) и двумя (б) разрывами в верхней секции; $h = 12$ мм

наплавляемая заготовка меньше, чем на участке токоподводящий электрод–поддон (точнее, электрод–зеркало металлической ванны), такой зоной, по-видимому, следует считать зону у поверхности шлаковой ванны, примыкающую к электродам. Однако нагрев шлака (моделирующего раствора) происхо-

дит по всей контактной поверхности электрода. Часть нагретого здесь раствора расширяется, становится легче и стремится всплыть, противодействуя потоку, возникающему под действием электромагнитных сил. Противодействие сил свободной конвекции электромагнитным силам в этой области приводит к зарождению нисходящих потоков не с поверхности моделирующей шлаковую ванну раствора, а на некотором расстоянии от нее. При дальнейшем приближении поддона к токоподводящим электродам видимое зарождение нисходящих потоков смещалось к нижней границе электродов.

При электрошлаковых процессах в токоподводящем кристаллизаторе происходит растекание тока от участка токоподвода как вдоль электродов (рис. 4, цифры у медных шин, соединяющих соседние электроды), так и по всему объему шлаковой ванны. Чтобы оценить картину растекания тока в моделирующем шлак растворе, проведен ряд экспериментов. В качестве измерительного инструмента для оценки уровня тока в выбранном направлении использовали небольшой трансформатор тока, представляющий собой ферритовое кольцо с медной обмоткой. Наружный диаметр трансформатора составлял 10,5 мм, а толщина – 7 мм. Протекающий через кольцо ток в растворе возбуждает магнитный поток в сердечнике феррита, который в свою очередь наводит ЭДС в обмотке трансформатора тока. Полученное напряжение фиксировали с помощью микровольтметра.

Коэффициент пропорциональности между измеренным напряжением и регистрируемым током в растворе предварительно определяли с помощью тарировки измерительной системы.

На рис. 5, а приведена схема экспериментов. Замеры выполняли как в направлении от электродов к заготовке и вдоль горизонтального потока в различных участках по периметру кристаллизато-

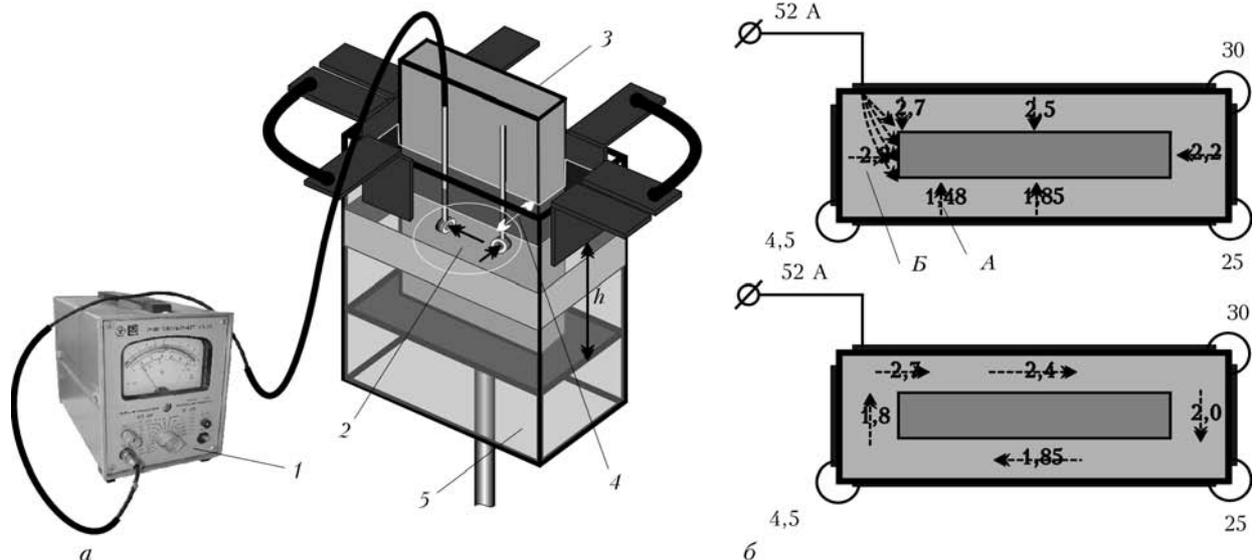


Рис. 5. Распределение тока в моделирующей шлаковую ванну растворе при наплавке в плоском токоподводящем кристаллизаторе: а – схема эксперимента; б – полученные значения тока в горизонтальной плоскости у нижнего торца токоподводящих электродов; 1 – измерительный прибор; 2 – расположение измерительного датчика в зазоре и направление измеряемых токов в модельном растворе; 3 – наплавляемая заготовка; 4 – зазор между заготовкой и стенкой модели; 5 – модель токоподводящего плоского кристаллизатора

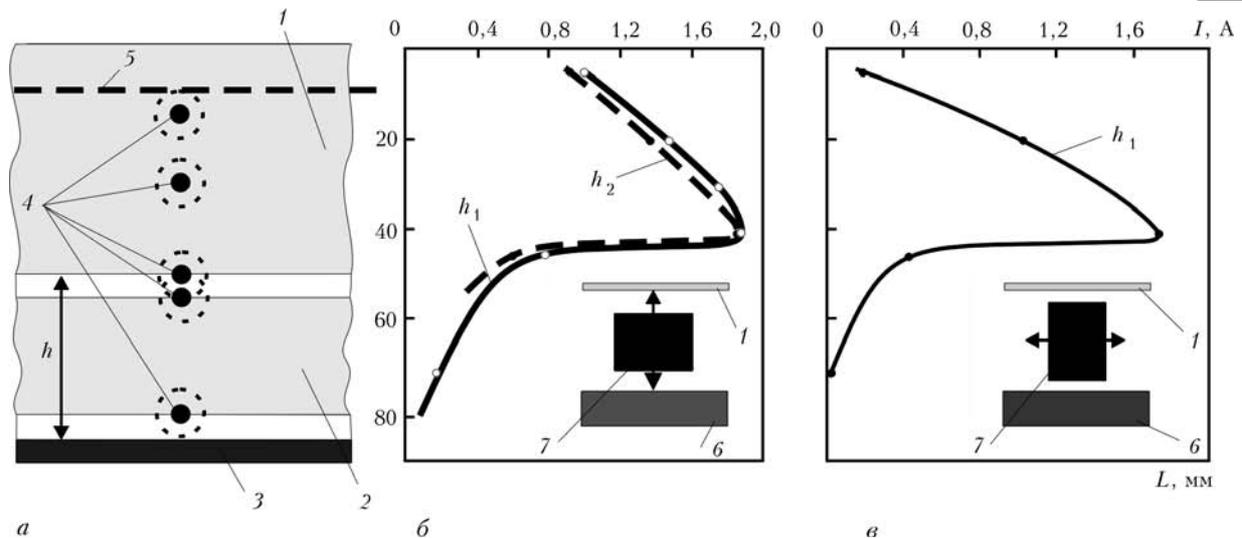


Рис. 6. Распределение тока по глубине моделирующего шлак раствора при наплавке в плоском токоподводящем кристаллизаторе: *a* — фрагмент кристаллизатора с участками замеров; *б, в* — радиальная и горизонтальная составляющие; *1* — токоподводящий электрод; *2* — медный контур промежуточной секции; *3* — поддон; *4* — участки замеров тока; *5* — уровень моделирующего шлак раствора в кристаллизаторе; *б* — заготовка под наплавку; *7* — расположение в зазоре измерительного трансформатора тока; $h_1 = 50$ мм; $h_2 = 12$ мм; L — глубина погружения измерительного трансформатора тока

ра, так и по высоте ванны от поверхности до поддона. Регистрируемый ток соответствовал току, протекающему в растворе в выбранном направлении через сечение, равное внутреннему диаметру (4 мм) трансформатора тока. В целом (как для схемы с одним, так и с двумя разрывами в цепи электродов) зафиксировано снижение тока в моделирующем шлак растворе по мере продвижения вдоль цепи электродов и удаления от места подключения токоподводящих кабелей. Аналогичный характер изменения тока обнаружен и в цепи токоподводящих электродов (в нашем случае 52 А–30 А–25 А–4,5 А). При измерении тока, протекающего в направлении от электродов к заготовке, наибольшее значение (2,7 А) зафиксировано в области раствора, непосредственно прилегающей к участкам подключения токоподводящих кабелей, а наименьшее (1,48 А) — в области, расположенной у противоположной стенки модели (рис. 5, б, область А). Повышение радиальной составляющей (от электрода к заготовке) тока в области Б, по-видимому, связано с ответвлением части тока от места подключения кабеля на торец наплавляемой заготовки.

Исследование распределения тока по глубине раствора показало, что наибольшие значения тока и для радиальной, и для горизонтальной (по периметру вдоль цепи электродов) составляющей находятся на уровне нижнего торца токоподводящих электродов (рис. 6). Непосредственно у поверхности раствора радиальная составляющая примерно в 5 раз превышала горизонтальную составляющую. При увеличении глубины погружения, вплоть до уровня нижнего торца токоподводящих электродов, зафиксировано плавное увеличение, а затем (в зазоре между токоподводящей секцией электродов и средней промежуточной секцией) — резкое снижение тока. На участке промежуточной секции зафиксировано плавное снижение тока. Изменение расстояния h от поддона до токоподводящих электродов от 50 до 12 мм способствовало некоторому снижению радиальной составляющей тока, а горизонтальная составляющая практически не изменилась (рис. 6, б, в). Такой характер изменения тока, по-видимому, связан с тем, что если расстояние до токоподводящей секции становится меньше, чем зазор между заготовкой и кристаллизатором, то определяющую роль в распределении тока по объему раствора, моделирующего шлаковую ванну, начинает играть вертикальная составляющая тока.

зонная составляющая практически не изменилась (рис. 6, б, в). Такой характер изменения тока, по-видимому, связан с тем, что если расстояние до токоподводящей секции становится меньше, чем зазор между заготовкой и кристаллизатором, то определяющую роль в распределении тока по объему раствора, моделирующего шлаковую ванну, начинает играть вертикальная составляющая тока.

Выводы

1. Установлено, что при наплавке в токоподводящем кристаллизаторе характер гидродинамических потоков в шлаковой ванне зависит от соотношения значений наплавляемого слоя и расстояния между токоподводящей секцией, а также уровня металлической ванны в кристаллизаторе. Если это соотношение больше 1, то обнаруживаются как вертикальные, так и горизонтальные потоки. По мере уменьшения данного соотношения интенсивность вертикальных потоков снижается, и преобладающее влияние оказывает горизонтальный поток, вращающийся вокруг наплавляемой заготовки.
2. Показано, что интенсивность вращения горизонтального потока увеличивается с повышением тока в цепи электроды токоподводящей секции–поддон и увеличением толщины наплавляемого слоя.
3. Определено, что растекание тока в шлаковой ванне неравномерно. Наибольшие значения тока и для радиальной, и для горизонтальной (по периметру вдоль цепи электродов) составляющей находятся на уровне нижнего торца токоподводящих электродов.

1. Цыгуленко К. А. Физическое моделирование гидродинамики шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе. Часть 1. Выплавка слитка // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 1. — С. 3–8.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 16.01.2008