

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ЭЛЕКТРОДОМ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, П. П. ОСЕЧКОВ, В. В. ОСИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При торцевой электрошлаковой наплавке исследовано влияние на проплавление основного металла различных схем подключения электрода к одному или двум источникам питания постоянного тока. Установлено, что для получения минимального и равномерного проплавления могут быть применены схемы подключения электрода как к одному, так и двум источникам питания постоянного тока. Уменьшение расстояния наплавляемой поверхности (торца заготовки) относительно токоведущей секции токоподводящего кристаллизатора приводит к повышению производительности наплавки и к уменьшению удельного расхода электроэнергии. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: торцевая электрошлаковая наплавка, электрод большого сечения, токоподводящий кристаллизатор, источники питания постоянного тока, наплавляемая поверхность, проплавление основного металла

Традиционно для питания электрошлаковых печей (процессы электрошлакового переплава (ЭШП), электрошлакового литья (ЭШЛ)), сварочных и наплавочных установок (процессы электрошлаковой сварки (ЭШС), электрошлаковой наплавки (ЭШН)), используют переменный ток промышленной частоты [1, 2]. Для печей этот выбор обусловлен простотой электротехнического оборудования и высоким качеством выплавляемого металла. Для сварочно-наплавочных установок определяющим фактором также является меньшая стоимость и простота электротехнического оборудования. При этом, например, устойчивость процесса ЭШС на переменном токе не хуже, чем на постоянном, а в случае работы на постоянном токе при больших его значениях, электролизные явления, происходящие в шлаковой ванне, могут нарушать устойчивость процесса.

Однако на начальном этапе развития ЭШП за рубежом достаточно широко использовали постоянный ток. И в настоящее время по разным причинам (производственным, металлургическим и экономическим) могут применять как комбинированный ток с наложением постоянного тока на переменный, так и чисто постоянный различной полярности [3–7]. В работе [6] обобщены некоторые особенности электрошлакового процесса на постоянном токе. Имеющиеся преимущества постоянного тока (в зависимости от полярности) по сравнению с переменным следовало проверить при ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе (ТПК).

Данная работа является продолжением исследований торцевой ЭШН электродами большого сечения (диаметром 40...130 мм) с использованием ТПК диаметром 180 мм) [8, 9]. Ее целью яв-

ляется оценка перспективности применения при ЭШН постоянного тока при использовании одного или двух источников и различных схем подсоединения электрода, изделия и токоведущей секции кристаллизатора. Металлургию электрошлакового процесса на постоянном токе в данной статье не рассматривали.

Методика выполнения экспериментов отличалась от принятой в работе [9] тем, что эксперименты выполняли только электродом диаметром 90 мм на жидком старте, а источниками питания являлись ВДУ-1202 и ВДМ-5000. Измерение, а также запись токов и напряжений проводили с помощью аппаратуры и программного обеспечения, указанных в работе [9]. На рис. 1 представлена структурная схема электрических соединений при проведении экспериментов для одноконтурной (а, б) и двухконтурной (в) ЭШН.

Прежде всего, перед началом выполнения экспериментов следовало уточнить возможность работы ТПК на обратной полярности. Еще в начале изучения электрошлакового процесса в обычном кристаллизаторе было установлено [10], что при использовании неплавящегося медного водоохлаждаемого электрода и флюсов различного химического состава устойчивый процесс наблюдался лишь в случае, когда электрод служил катодом (прямая полярность). Процесс на обратной полярности удалось осуществить лишь с использованием шлаков, не содержащих SiO_2 , в частности, с химически чистым CaF_2 . Однако в этом случае наблюдалось интенсивное разрушение поверхности электрода. В случае применения угольного электрода устойчивость процесса не отличалась от имевшей место при плавлении плавящихся ме-

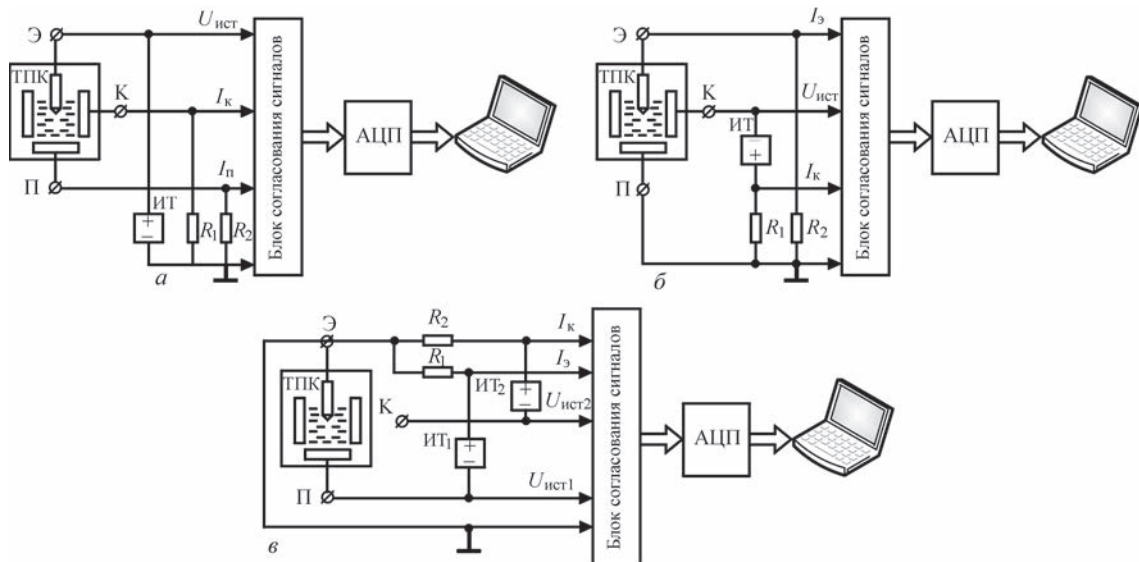


Рис. 1. Структурная схема электрических соединений для проведения экспериментальных наплавки для одноконтурной (а, б) и двухконтурной (в) ЭШН: Э, К, П — клеммы подсоединения электрода, токоведущей секции кристаллизатора и поддона с изделием, соответственно; ИТ (ИТ1 и ИТ2) — источник постоянного тока; $R1$ и $R2$ — измерительные токовые шунты; $U_{ист}$ ($U_{ист1}$ и $U_{ист2}$), I_k , I_p и I_3 — сигналы, пропорциональные напряжению источника тока, току кристаллизатора, поддона электрода, соответственно; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

таллических электродов (стальных, медных, вольфрамовых, молибденовых и т. п.).

Следует отметить, что один из разработчиков конструкции ТПК также утверждает, что токоподводящий кристаллизатор может эксплуатироваться только при подведении к нему постоянного тока прямой полярности. При обратной полярности электрошлаковый процесс постепенно прекращается [11]. Как видно, имеется некоторое противоречие информации в работах [10, 11]. В первом случае электрошлаковый процесс с угольным электродом стабильно осуществляется на постоянном токе любой полярности, как это происходит при плавлении расходующих электродов. В случае же использования ТПК, медная токоведущая секция которого защищена графитовой (угольной) футеровкой, через которую ток протекает в шлаковую ванну, процесс на обратной полярности не только не стабилизируется, но и прекращается.

В связи с тем, что при наведении в кристаллизаторе шлаковой ванны наряду с жидким стартом в ряде случаев используется и твердый, изучали электрошлаковый процесс в условиях, когда водоохлаждаемый электрод (с графитовой насадкой на его рабочем торце) и токоведущая секция ТПК (имеющей графитовую защитную футеровку) были, соответственно, анодом и катодом по отношению к поддону с заготовкой. В экспериментах использовали источник питания ВДМ-5000 и флюс АНФ-29, ранее не применявшийся в названных выше работах.

Опыт с водоохлаждаемым электродом и графитовой насадкой осуществляли путем наведения шлаковой ванны в формирующей секции ТПК, без подведения напряжения к его токоведущей

секции, т. е. ТПК в данном эксперименте являлся обычным кристаллизатором. Шлаковая ванна формировалась лишь у поверхности насадки в виде кольца шириной примерно 30 мм и даже при увеличении тепловой мощности, вводимой в ванну, эта зона существенно не изменяла свои размеры. Кроме того, на верхней границе раздела шлак – поверхность насадки по всему периметру наблюдали микродуги, похожие на те, что описаны в работе [10]. Процесс пришлось прекратить. Осмотр рабочей части насадки показал следующее. На ее торце образовалась полоса шириной около 5 мм и глубиной 3...5 мм. Причем вся эта «траншея» покрыта мелкими язвочками, которые, по-видимому, являются местами возникновения микродуг. В области же, где микродуги наблюдались на поверхности шлака, никаких видимых изменений поверхности насадки не обнаружено. Схема износа насадки и ее внешний вид после испытания представлены на рис. 2.

Проверку работоспособности ТПК на обратной полярности выполняли путем заливки расплавленного и перегретого в отдельной емкости шлака вовнутрь того же самого кристаллизатора, но с подводом напряжения к его токоведущей секции. Уже через несколько секунд после заливки шлаковая ванна стала подстывать; лишь в локальных ее зонах было замечено яркое свечение и некоторое движение шлака. Затем охлаждение ванны произошло по всей ее поверхности со снижением значения тока до нуля.

Таким образом, как водоохлаждаемые графитовые электроды, так и токоведущие секции ТПК, имеющие защитную графитовую футеровку, не позволяют на обратной полярности осуществлять стабильный электрошлаковый процесс.

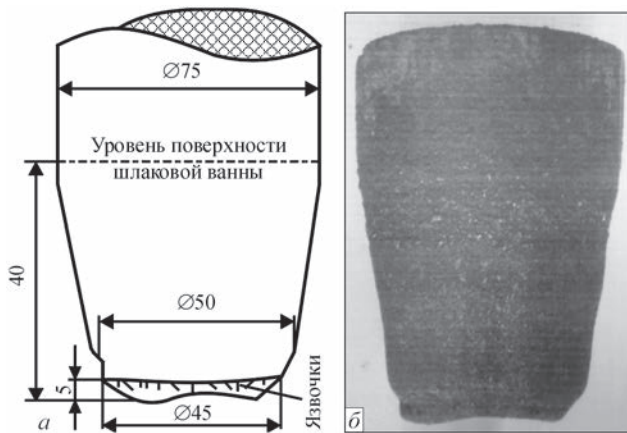


Рис. 2. Схема износа насадки (а) и ее внешний вид после испытания (б)

Исходя из полученных результатов, наплавки в ТПК необходимо выполнять на прямой полярности. Однако следует внести некоторые терминологические пояснения. В сварочной науке принято полярность оценивать в относительном виде [12]. Это предполагает наличие следующих отношений: если с клеммы (+) источника питания напряжение подается на изделие, а с клеммы (-) на электрод, то полярность считается прямой. В случае обратного подключения имеет место обратная полярность. Именно исходя из такого подключения к источнику питания, в работе [6] рассматриваются особенности электрошлакового процесса при разной полярности.

Если же во время электрошлакового процесса шлаковая ванна контактирует не с одним, а с двумя электродами (расходуемый электрод и токоведущая секция ТПК), то возникает неопределенность при оценке типа подключения кристаллизатора относительно расходуемого электрода. Чтобы исключить эту неопределенность, в дальнейшем при рассмотрении различных электрических схем подключения источника (источников), будем использовать лишь обозначения символов (+) или (-), не уточняя полярность процесса наплавки.

В таблице приведены результаты экспериментов по исследованию влияния электрических параметров процесса ЭШН на постоянном токе в ТПК (при использовании разных схем его подключения) на проплавление основного металла.

Проведены три эксперимента с одноконтурной схемой подключения источника тока ОС1 (рис. 1, а), ОС2 (рис. 1, б) и с двухконтурной ДСЭ (рис. 1, в). При этом предварительно выполненные эксперименты с ЭШН по схеме ОС1 с подключением электрода к клемме (-), а также ОС2 с подключением токоведущей секции ТПК к клемме (+), показали отрицательные результаты, процесс шел вяло с постепенным его прекращением, что связано с наличием «вентильного эффекта» при ЭШН. Поэтому эксперименты 45М и 47М выполнялись с подключением расходуемого электрода к клемме (+).

Было установлено, что образцы, полученные в экспериментах 45М и 47М, имеют, практически, одинаковые показатели качества наплавки. При этом у образца эксперимента 45М несколько лучшие значения показателей по производительности и удельному расходу электроэнергии. Кроме того, схема ДСЭ (рис. 1, в) более сложная в реализации из-за наличия двух источников питания. Из этого следует, что торцевые электрошлаковые наплавки на постоянном токе с одноконтурной схемой подключения источника тока, по сравнению с двухконтурной схемой, более предпочтительны. Макрошлиф биметаллического образца эксперимента 45М представлен на рис. 3.

Из трех проведенных экспериментов эксперимент 46М показал наихудшие результаты как по производительности процесса, так и по удельному расходу электроэнергии. Эксперимент по схеме ОС2 приводит (по сравнению с ОС1) к уменьшению G в 4 раза, увеличению Q в 3,8 раза, увеличению H_{cp} с 1 до 3 мм и Δ_{cp} с 0,8 до 2,0 мм. Такие результаты объясняются тем, что через ТПК проходит наибольший ток, равный сумме токов на электроде и изделии. Из-

Показатели торцевых электрошлаковых наплавок в ТПК на постоянном токе

Номер эксперимента	Диаметр электрода, мм	Схема подключения	Ток, кА		Напряжение, В			N_o , кВт·А	N_k/N_o , %	V_3 , мм/мин	G , кг/ч	h , мм	Q , кВт·ч/кг	Качество наплавки		
			К	Э	К	Э	П							H_{cp} , мм	Δ_{cp} , мм	КНП
45М	90	ОС1	2,3	2,6	0	43	0	110	88	34	83	44	1,3	1	0,8	Удов.
46М	90	ОС2	2,94	1,09	0	36	36	106	100	14	21	44	5	3	2	Хор.
47М	90	ДСЭ	0,74	1,87	6	62	0	111	40	42	69	44	1,6	1	0,8	Хор.

Примечание. ОС1и ОС2 — одноконтурные схемы подключения ТПК, первая с одинаковыми потенциалами на изделии и токоведущей секции ТПК, вторая с одинаковыми потенциалами на изделии и электроде, соответственно; ДСЭ — двухконтурная схема подключения ТПК с общей точкой подключения обоих источников на электроде; N_o — общая мощность, потребляемая ТПК; N_k/N_o — соотношение мощностей на кристаллизаторе и общей; V_3 — скорость движения электрода; G — производительность наплавки; h — расстояние от наплавляемой поверхности до верха формирующей секции; Q — удельный расход электроэнергии; H_{cp} — средняя глубина проплавления; Δ_{cp} — средняя неравномерность проплавления; КНП — качество формирования наплавляемой поверхности (экспертная оценка).

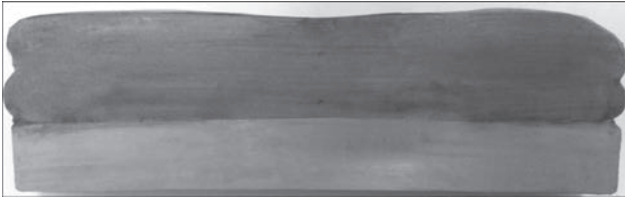


Рис. 3. Макрошлиф биметаллической заготовки эксперимента 45М

за этого доля мощности, расходуемая на плавление электрода и нагрев металлической ванны, уменьшилась и, соответственно, упала производительность, повысился расход электроэнергии. Исходя из результатов эксперимента 46М по схеме с одинаковыми потенциалами на заготовке и электроде, можно сделать вывод, что наплавки с такой схемой подключения не следует использовать для получения качественной ЭШН.

Интересно сравнить результаты экспериментов, проведенных с использованием источника переменного тока [9] и источника постоянного тока при одинаковых схемах подключения и с одинаковыми диаметрами электродов, но с различным расположением наплавляемой поверхности относительно верха формирующей секции. Эксперимент 22М [9] проводился с $h = 85$ мм, а 45М с $h = 44$ мм. Уменьшение в 2 раза расстояния между наплавляемой поверхностью и верхом формирующей секции привело к повышению производительности процесса ЭШН в 1,7 раза, а также снизило энергопотребление в 1,8 раза, значение средней глубины проплавления основного металла с 7 до 1 мм и значение средней неравномерности проплавления с 3,0 до 0,8 мм.

В работе [9] рассматривалась перспективность исследования ЭШН по двухконтурной схеме питания с общей точкой подключения обоих источников на электроде, имеющей, предположительно, более высокую производительность, чем схема с общей точкой подключения на изделии. В данной работе эксперимент 47М проведен с подключением двух источников постоянного тока, имеющих общую точку подключения на электроде (рис. 1, в). При этом расходуемый электрод и токоведущая секция ТПК подключены к клеммам (+).

На электроде потенциал по отношению к изделию +62 В (см. таблицу), а на токоведущей секции кристаллизатора +6 В, соответственно. Потенциал на токоведущей секции кристаллизатора, по отношению к электроду, составляет -56 В, т. е. через токоведущую секцию кристаллизатора на изделие ток практически не проходит, что должно, по нашему мнению, снизить эффективность процесса при данной схеме подключения источников. Эксперимент 25М [9] проведен с подключением двух источников переменного тока, имеющих общую точку подключения на изделии. Напряжение на

электроде приблизительно 68 В, на токоведущей секции кристаллизатора около 37 В. Сравнение результатов рассматриваемых экспериментов показывает преимущество способа ЭШН на постоянном токе. Так, эксперимент 47М, в отличие от 25М, дает увеличение производительности процесса, уменьшение удельного расхода электроэнергии и улучшение качества сплавления. Предположительно это связано с тем, что на электроде, являющемся анодом, создается повышенное прианодное падение потенциала, которое способствует увеличению скорости плавления электрода. Кроме того, через изделие проходит ток 1,13 кА (ток на электроде минус ток на изделии). Это составляет 60 % общего тока, протекающего через электрод, что способствует хорошему сплавлению основного и наплавленного металлов.

Выводы

1. Установлена возможность выполнения торцевых ЭШН при различных электрических схемах подключения электродов от одного или двух источников питания постоянного тока и исследовано влияние электрических и технологических параметров на проплавление основного металла.

2. Установлено, что для получения минимального и равномерного проплавления могут быть применены схемы подключения электрода как к одному, так и двум источникам питания постоянного тока. Однако наплавки на постоянном токе с двухконтурной схемой подключения источников тока, по сравнению с одноконтурной схемой, менее предпочтительны из-за сложности в реализации (наличие двух источников питания).

3. Уменьшение расстояния наплавляемой поверхности (торца заготовки) относительно токоведущей секции ТПК приводит к повышению производительности наплавки и к уменьшению удельного расхода электроэнергии.

4. Эксперименты показали, что ЭШН на постоянном токе по схеме с одинаковыми потенциалами на изделии и электроде, не позволяет получать качественную наплавку.

5. Как предполагалось в работе [9], ЭШН по двухконтурной схеме питания с общей точкой подключения обоих источников на электроде имеет более высокую производительность и более низкий удельный расход электроэнергии, чем схема с общей точкой подключения источников на изделии.

6. Полученные результаты могут составить банк данных для построения системы автоматического регулирования проплавления основного металла при торцевой ЭШН.

Список литературы

1. (1976) *Электрошлаковые печи*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.

2. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б. Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
3. (1982) *Электрошлаковая технология за рубежом*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
4. Чен Ч. С., Гао Р. Ф. (1989) Исследование электрошлакового переплава в составном кристаллизаторе с футерованной верхней частью. *Проблемы спец. электрометаллургии*, **4**, 42-47.
5. Лагаш Ю. В., Матях В. Н. (1987) *Современные способы производства слитков особо высокого качества*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
6. Миронов Ю. М. (2002) Влияние рода тока на процессы в электрошлаковых установках. *Электрометаллургия*, **4**, 25-32.
7. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б. Е., Медовар Б. И. (ред.). Киев, Наукова думка.
8. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А. (2017) Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **12**, 40-45.
9. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В. (2018) Электрошлаковая наплавка торцов заготовок с использованием расходоуемого и нерасходоуемого электродов. *Там же*, **2**, 48-52.
10. Дудко Д. А., Рублевский И. Н. (1958) Влияние рода тока и полярности на металлургические процессы при электрошлаковой сварке. *Там же*, **3**, 69-78.
11. Ксендзык Г. В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Спец. электрометаллургия*, **27**, 32-40.
12. Патон Б. Е. (ред.) (1974) *Технологии электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.
11. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-supplying mold providing rotation of slag pool. *Spets. Elektrometallurgiya*, **27**, 32-40 [in Russian].

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловьев, П. П. Осечков, В. В. Осин

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДОМ
ВЕЛИКОГО ПЕРЕРІЗУ НА ПОСТІЙНОМУ СТРУМІ
В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

При торцевому електрошлаковому наплавленні досліджено вплив на проплавлення основного металу різних схем підключення електрода до одного або двох джерел живлення постійного струму. Встановлено, що для отримання мінімального і рівномірного проплавлення можуть бути застосовані схеми підключення електрода як до одного, так і двох джерел живлення постійного струму. Зменшення відстані наплавлюваної поверхні (торця заготовки) відносно струмоведучої секції струмопідвідного кристалізатора призводить до підвищення продуктивності наплавлення і до зменшення питомої витрати електроенергії. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: торцеве електрошлакове наплавлення, електрод великого перерізу, струмопідвідний кристалізатор, джерела живлення постійного струму, наплавляюча поверхня, проплавлення основного металу

Yu.M. Kuskov, V.G. Solovjev, P.P. Osechkov, V.V. Osin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ELECTROSLAG SURFACING WITH LARGE SECTION
ELECTRODE AT DIRECT CURRENT IN A
CURRENT-SUPPLYING MOULD

The influence of different circuits of electrode connection to one or two d.c. power sources on base metal penetration was studied at electroslag surfacing of end faces. It is established that circuits of electrode connection both to one and to two d.c. power sources can be applied to produce a minimum and uniform penetration. Reduction of the distance of the processed surface (electrode end face) relative to the current-conducting section of the current-supplying mould leads to increase of deposition efficiency and to reduction of the specific power consumption. 12 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electroslag surfacing of end faces, large section electrode, current-supplying mould, d.c. power sources, deposited surface, base metal penetration

Поступила в редакцию 07.10.2017

**5-я Международная научно-практическая конференция
«Эффективная сварка: качество, ресурсосбережение, безопасность».**
27 марта 2018 г. Минск, Беларусь

Контакты: svarka77@inbox.ru