

## ТОРЦЕВАЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ НАПЛАВКА ЭЛЕКТРОДОМ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Ю. М. КУСКОВ, В. Г. СОЛОВЬЕВ, В. А. ЖДАНОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Торцевую электрошлаковую наплавку предложено выполнять с использованием токоподводящего кристаллизатора (ТПК) и вводом в его центральную часть переплавляемого электрода большого сечения. При этом предложены две электрические схемы подключения переплавляемого электрода. По первой схеме как к расходуемому, так и кольцевому нерасходуемому (верхняя секция ТПК) электродам подведен одинаковый потенциал. По второй схеме потенциалы на обоих электродах отличаются. В результате проведенных на флюсе АНФ-29 опытных наплавов в ТПК диаметром 180 мм электродами из стали 40 диаметром 40...130 мм была предложена следующая техника выполнения наплавов. После наведения в ТПК шлаковой ванны первый этап (соединение основного и наплавленного металлов) рекомендуется выполнять по первой электрической схеме. При этом плавление электрода будет замедленным, но при оптимальной вводимой в шлаковую ванну через ТПК электрической мощности можно достичь равномерного проплавления основного металла. В дальнейшем, при наплавке последующих слоев с повышенной производительностью и хорошим качеством наплавленного слоя следует переходить на вторую электрическую схему подключения переплавляемого электрода. Библиогр. 8, рис. 5.

*Ключевые слова:* торцевая ЭШН, электрод большого сечения, ТПК, электрические схемы ЭШН, проплавление основного металла, формирование наплавленного металла, производительность

Качество наплавки, выполненной любым известным способом, особенно при соединении металлов с резко отличающимися свойствами, во многом определяется возможностью достигать минимального и равномерного проплавления по всей соединяемой поверхности. В противном случае не решается полностью задача придания наплавленному металлу специальных свойств (износостойкости, стойкости против термической усталости, коррозионной стойкости и т. д.). Это особенно важно при наплавке относительно небольших толщин наплавленного металла. В зависимости от способа электрошлаковой наплавки (ЭШН), доля основного металла в наплавленном составляет 5...20 % [1]. Тем не менее, главным преимуществом многих способов ЭШН, помимо высокой производительности процесса, является возможность нанесения больших масс металла.

В этом случае сохранение заданных специальных свойств наплавленного металла по толщине наплавленного слоя (особенно в слоях, достаточно удаленных от зоны сплавления) не вызывает каких-либо трудностей. Сложности могут возникать в зоне сплавления биметалла из-за большей или меньшей степени перемешивания соединяемых металлов и возникновения в этой зоне промежуточных структур с хрупкими составляющими (мартенсит, карбидные, нитридные и т. п. выделения с различными размерами и характером расположения), которые резко снижают механическую прочность соединения, либо уже в процессе наплавки способствуют образованию дефектов,

чаще всего трещин. Поэтому именно эта проблема зачастую не позволяет полностью реализовать все достоинства высокопроизводительного процесса. Красноречивым примером такого положения является так называемая объемная ЭШН зубьев ковшей карьерных экскаваторов [2]. Это хорошая технология, решает большую задачу реставрации дорогостоящего горного инструмента, но наплавленные (отреставрированные) ковши стараются ставить в эксплуатацию на относительно легко обрабатываемые породы, при переработке которых не возникает повышенных ударных нагрузок.

Казалось бы, наиболее простым решением этой проблемы является выполнение сложной термической обработки биметаллического изделия. Но это в большинстве случаев выполнить просто невозможно из-за отсутствия соответствующих по размерам и температурам термических печей и, самое главное, снижается эффективность процесса наплавки, теряется целесообразность ее применения.

Таким образом, несмотря на то, что величина проплавления является важной характеристикой любого способа наплавки (дугового, плазменного и т. д.), для ЭШН она приобретает особое значение в случае некачественной наплавки больших масс зачастую дорогостоящего металла. Следует отметить, что в этом случае и удаление дефектов зоны сплавления представляет собой трудновыполнимую задачу.

Целью работы является получение первичных экспериментальных данных и выбора направле-

ния дальнейших исследований для создания системы автоматического регулирования качества торцевой ЭШН электродом большого сечения в ТПК.

При ЭШН в водоохлаждаемых устройствах-кристаллизаторах в качестве электродов обычно используют либо проволочные и ленточные электроды, либо так называемые электроды большого сечения (прутки, стержни и т. п. с площадью сечения примерно до 35000 мм<sup>2</sup>). Эти технологии можно рассматривать как частные случаи известного и хорошо изученного электрошлакового процесса — электрошлакового переплава (ЭШП). Отличие состоит лишь в том, что в первом случае на поверхности заготовки наплавляется металл той или иной толщины, во втором первоначальный слой металла слитка начинает формироваться на затравке, представляющей собой пластину толщиной 10...30 мм. Если для ЭШН, как мы уже отметили, величина проплавления играет существенную роль, то при ЭШП задача состоит лишь в хорошем сплавлении металлов затравки и слитка, тем более что после переплава эта нижняя (донная) часть слитка удаляется (до 15 % массы слитка) [3]. Для нас важно оценить, как в близком к ЭШН процессе формируется металлическая ванна (размеры, глубина), так как именно тепло, передаваемое от ванны к затравке, определяет нагрев и проплавление последней.

Из рис. 1 видно, что основная тепловая энергия выделяется под торцом электрода, придавая металлической ванне специфическую конусообразную форму. Соответственно, проплавление затравки максимально по оси слитка с его уменьшением (или исчезновением) по краям слитка. Из этого анализа следует, что такой способ соединения металлов не может быть применен для получения качественной наплавки.

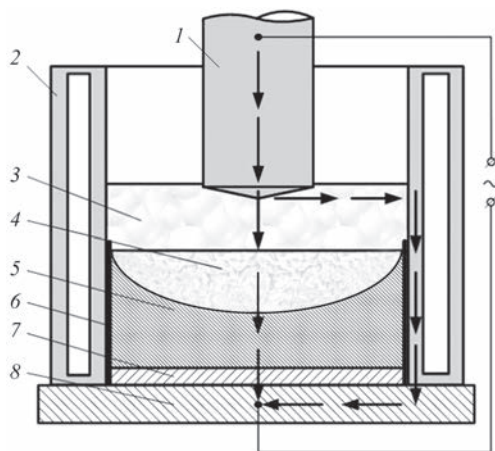


Рис. 1. Форма металлической ванны при ЭШП (стрелками показано распределение тока в кристаллизаторе): 1 — электрод; 2 — кристаллизатор; 3 — шлаковая ванна; 4 — металлическая ванна; 5 — слиток; 6 — гарнисаж; 7 — затравка; 8 — поддон

Для устранения этого недостатка перспективным может оказаться применение для наплавки ТПК [4-7], который, по сути, является секционным нерасходуемым электродом кольцевого типа, к верхней секции которого подведено напряжение. Такая форма электрода, соответственно, влияет на характер распределения тока в шлаковой ванне. Ток со стенки электропроводящего кольца частично идет по горизонтальному направлению, но, главным образом, вертикально, на наплавляемую поверхность заготовки. Причем большая его часть проходит непосредственно в пристенной области кристаллизатора. Это подтверждается и результатами работы [8] по моделированию процесса торцевой наплавки на электропроводной бумаге: примерно 50...90 % тока (в зависимости от удаления от стенки кристаллизатора) протекает именно в этой области.

На рис. 2 представлена форма металлической ванны, получаемая при наплавке в ТПК дискретной присадкой, т.е. при отсутствии в середине кристаллизатора теплового центра, создаваемого электродом, как это имеет место при обычном ЭШП.

Можно предположить, что если ввести в ТПК расходуемый наплавочный электрод и оптимально распределить электрическую мощность между кольцевым нерасходуемым электродом и плавящимся расходуемым, то можно обеспечить минимальное и равномерное проплавление основного металла.

Были проведены эксперименты по изучению возможности использования при наплавке одной из двух электрических схем подключения расходуемого электрода (рис. 3). По первой схе-

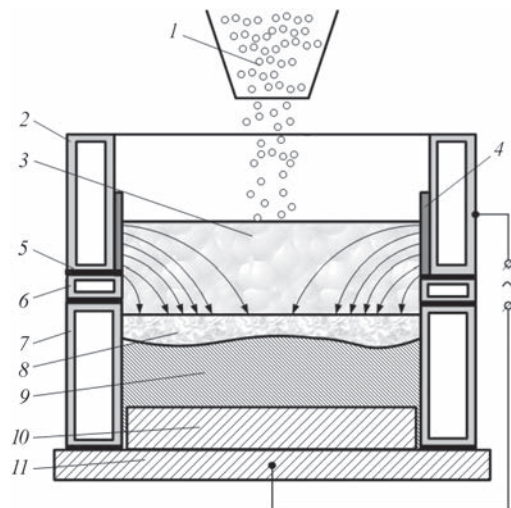


Рис. 2. Форма металлической ванны, получаемая при ЭШН в ТПК дискретной присадкой (стрелками показано распределение тока в ТПК): 1 — дискретная присадка; 2, 6, 7 — токоведущая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора, соответственно; 3 — шлаковая ванна; 4 — защитная футеровка; 5 — изоляционная прокладка; 8 — металлическая ванна; 9 — наплавленный металл; 10 — заготовка; 11 — поддон

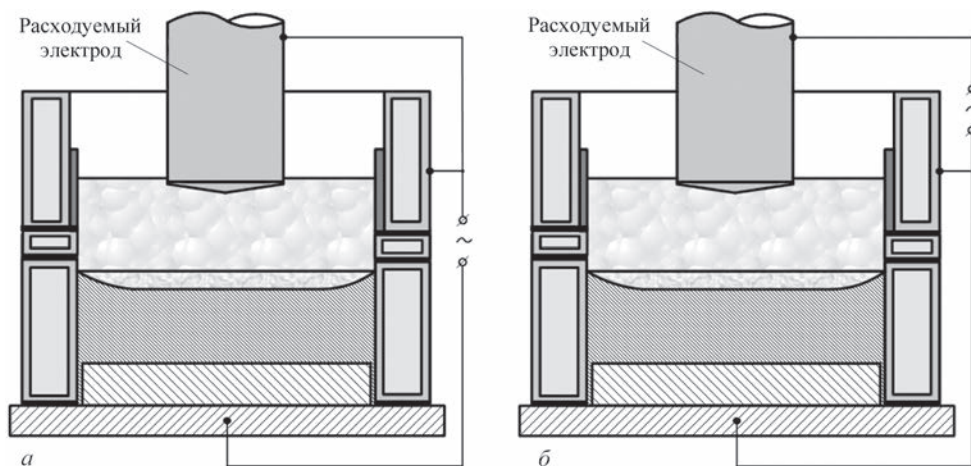


Рис. 3. Электрические схемы подключения переплавляемого электрода при одинаковом (а) и отличающемся (б) потенциале с ТПК

ме (рис. 3, а) к электродам разного типа подведен одинаковый потенциал, по второй – расходующий электрод имеет иной потенциал.

В качестве критерия оптимальности технологии, кроме достижения минимального и равномерного проплавления основного металла, принимали во внимание качество формирования наружной поверхности наплавляемого слоя и производительность наплавки.

Эксперименты по наплавке выполняли на твердом старте в стационарном ТПК диаметром 180 мм электродами из стали 40 диаметром 40...130 мм. Флюс АНФ-29, ток переменный.

Из наплавленных заготовок механическим путем изготавливали продольные шлифы, на которых после шлифовки и химического травления изучали зону сплавления. Внешний вид наплавленных заготовок (боковую поверхность и верхнюю плоскость слоя) оценивали визуально.

Эксперименты по наплавке по первой (рис. 3, а) электрической схеме (одинаковые потенциалы на электроде и ТПК) показали следующее. Плавление электрода диаметром 90 мм происходит очень медленно (при сравнении с процессом ЭШП) при его заглублении в шлаковую ванну от 15 до 70 мм. Причем плавление электрода идет лишь по его торцевой части (боковая поверхность не оплавляется). Проплавления основного металла не наблюдается. Боковая поверхность наплавленного металла имеет гофры. В случае использования электрода большего диаметра (130 мм) сам процесс наплавки и ее результаты аналогичны результатам наплавки с использованием электрода диаметром 90 мм.

При наплавке электродом диаметром 40 мм наблюдается как ускоренное плавление электрода (при общей подводимой мощности  $N = 99 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ), так и замедленное ( $N = 87 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ ).

По-видимому, стабильность процесса ЭШН, скорость вращения шлаковой ванны, влияющая на плавление электрода и, в конечном счете, произ-

водительность процесса и качество наплавки, во многом определяются вводимой в шлаковую ванну через ТПК электрической мощностью  $N_{\text{ТПК}}$ . На рис. 4 показан продольный макрошлиф биметаллической заготовки, полученной наплавкой электродом диаметром 40 мм с  $N = 87 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ .

Как следует из результатов наплавки по данной электрической схеме, при использовании электродов различного диаметра глубокое проплавление основного металла не наблюдается ни в пристенной зоне кристаллизатора, ни под электродом. Следовательно, такая схема ЭШН, в принципе, позволяет создать равномерное тепловое поле и, соответственно, одинаковые условия проплавления по всей наплавляемой поверхности заготовки при соответствующей оптимальной вводимой через ТПК электрической мощности. Еще одним косвенным подтверждением выравнивая электрической мощности по поперечному сечению кристаллизатора и формирования в нем более плоской металлической ванны, является наблюдаемое в процессе наплавки увеличение скорости вращения шлаковой ванны при извлечении электрода из шлака за счет перераспределения рабочего тока на электрод и ТПК в пользу последнего.

Наплавки по второй (рис. 3, б) электрической схеме подсоединения переплавляемого электрода

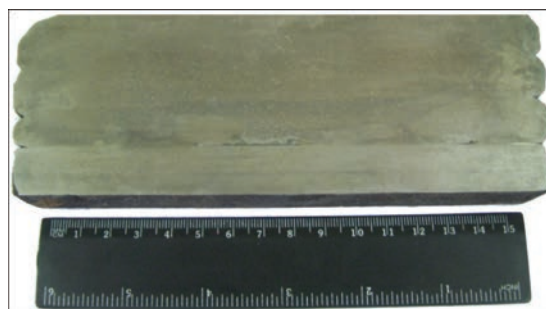


Рис. 4. Продольный макрошлиф биметаллической заготовки, полученной наплавкой электродом диаметром 40 мм при  $N_{\text{ТПК}} = 87 \text{ кВ}\cdot\text{А}$

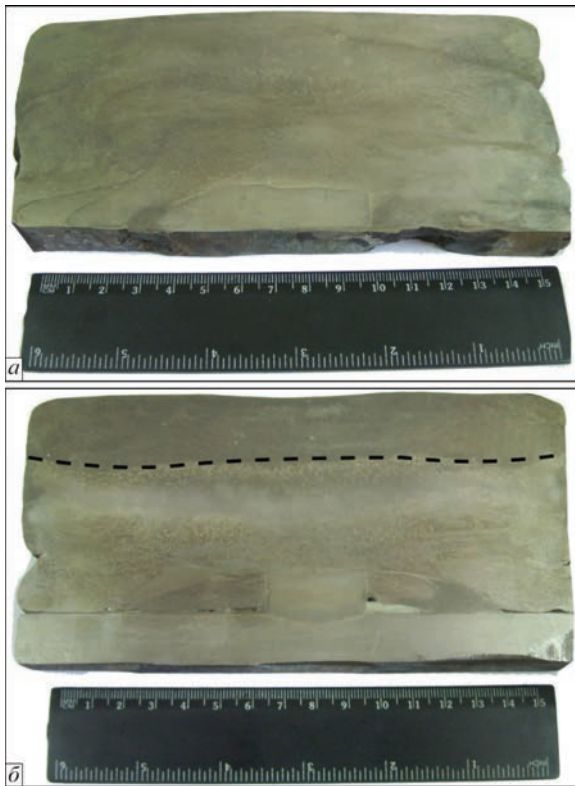


Рис. 5. Продольный макрошлиф биметаллической заготовки, полученной наплавкой электродом диаметром 90 мм при  $N_{\text{тпк}} = 80...90$  (а) и  $130...135$  кВ·А (б) (штриховой линией обозначена форма металлической ванны в наплавленном металле)

показали следующие результаты. Прежде всего, эта технология наплавки позволяет значительно повысить производительность процесса плавления электрода. Так, при наплавке электродом диаметром 40 мм скорость плавления электрода увеличивается до двух-трех раз, а электродом диаметром 90 мм — примерно в 2 раза. Формирование наплавленного металла и качество зоны сплавления существенно зависят от режима наплавки. На рис. 5 представлены макрошлифы образца, полученного наплавкой электродом диаметром 90 мм при разной электрической мощности процесса. При малой мощности ( $N_{\text{тпк}} = 80...90$  кВ·А) в центральной части шлифа наблюдается сформированное под воздействием переплавляемого электрода «нулевое» сплавление (по типу пайки) на длине 40 мм, остальные зоны имеют глубокое проплавление ( $\geq 20$  мм) — рис. 5, а. Это объясняется тем, что в данном случае наибольший ток шел от кольцевого нерасходуемого электрода. При этом формирование боковой поверхности наплавленного слоя неудовлетворительное (наличие множества гофр). При  $N_{\text{тпк}} = 130...135$  кВ·А (рис. 5, б) центральная часть шлифа на длине примерно 50 мм имеет небольшое проплавление (около 5 мм), в остальных зонах на линии сплавления много шлаковых прослоек, без проплавления основ-

ного металла. Металлическая ванна в наплавленном металле имеет относительно плоскую форму.

Из сказанного выше следует, что наплавки по технологиям с различным электрическим подключением переплавляемого электрода могут обеспечить получение равномерного и минимального проплавления основного металла и достижения других критериальных показателей при введении в шлаковую ванну оптимальной электрической мощности. По-видимому, можно принять для решения поставленной задачи следующую технику наплавки. После наведения в токоподводящем кристаллизаторе шлаковой ванны (при твердом или жидком старте) первый этап наплавки (соединения основного и наплавленного металлов) необходимо выполнять по первой схеме подключения переплавляемого электрода. При этом плавление электрода будет замедленным, но при оптимальной вводимой в шлаковую ванну через ТПК электрической мощности можно достичь равномерного проплавления основного металла. В дальнейшем, т. е. при наплавке слоя большой толщины, когда необходимо получить повышенную производительность процесса и качественную поверхность наплавленного слоя, следует переходить на вторую схему электрического подключения электрода.

В целом, выполненные эксперименты показали, что регулирование тепловых потоков при торцевой ЭШН как в зоне сплавления, так и при формировании наплавленного слоя это сложная задача, решение которой зависит от многих параметров (как геометрических, так и электрических). Поэтому дополнительно необходимо выполнить детальное, всестороннее исследование этого способа наплавки. При этом следует рассмотреть следующее: использование иных схем подключения, иного количества источников питания и видов применяемого тока, применение не только переплавляемых электродов, но и нетоковедущих расходуемых заготовок различного диаметра, оптимизацию положения наплавленной поверхности по отношению к токоведущей секции ТПК.

Проведение таких исследований позволит не только найти оптимальное решение поставленной задачи, но и создать предпосылки для автоматического регулирования процесса торцевой ЭШН и получения заданных результатов качества даже при отклонении значений некоторых параметров от первоначально заданных.

### Выводы

1. В отличие от иных способов наплавки качество электрошлаковой наплавки больших масс металла существенно зависит от качества зоны сплавления

основного и наплавленного металлов и в меньшей мере от качества самого наплавленного металла.

2. Рассмотрена возможность выполнения торцевых ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе электродом большого сечения по двум электрическим схемам – при одинаковом и отличающемся потенциале на переплавляемом электроде и ТПК с целью получения не только минимального и равномерного проплавления основного металла, но и достижения высокой производительности процесса при хорошем формировании наплавленного слоя.

3. Рекомендовано вести процесс наплавки на первом этапе соединения металлов по технологии, когда переплавляемый электрод и ТПК имеют один и тот же потенциал. В дальнейшем, при наплавлении последующих слоев следует переходить на вторую электрическую схему подключения переплавляемого электрода (электрод и ТПК имеют отличающиеся потенциалы). Это позволит существенно повысить производительность наплавки при хорошем формировании наплавленного слоя.

4. По результатам выполненных исследований предложено выполнить более всестороннее изучение процесса торцевой ЭШН электродом большого сечения. В качестве рассматриваемых технологических показателей (как электрических, так и геометрических) выбраны схемы подключения электрода, количество используемых источников питания, вид применяемого тока, применение не только переплавляемых электродов, но и нетоковедущих расходимых заготовок, расположение наплавленной поверхности по отношению к токоведущей секции ТПК.

5. Конечной целью проведенных и планируемых исследований является формирование банка данных для создания системы автоматического регулирования процесса торцевой ЭШН и получения повторяемости результатов качества наплавки.

### Список литературы

1. Кусков Ю. М., Скороходов В. Н., Рябцев И. А., Сарычев И. А. (2001) *Электрошлаковая наплавка*. Москва, ООО «Наука и технологии».
2. Пономаренко В. П., Шварцер А. Я., Строганова Г. В. (1985) Исследование зоны сплавления высокохромистого чугуна с высокомарганцевистой сталью при электрошлаковой наплавке. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **11**, 55–58.
3. Лагаш Ю. В., Медовар Б. И. (1970). *Электрошлаковый переплав*. Москва, Metallurgiya.
4. Фрумин И. И., Ксендзык Г. В., Ширин В. С. (1980) *Аппарат для электрошлакового переплава и наплавки*. США, Пат. 4185682.
5. Кусков Ю. М. (2013) Электрошлаковая наплавка в секционном токоподводящем кристаллизаторе. *Сварщик*, **3**, 21–23.
6. Кусков Ю. М., Гордань Г. Н., Богайчук И. Л., Кайда Т. (2015) В. Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 34–37.

7. Kuskov Yu. M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding Journal*, **4**, 42–45.
8. Томиленко С. В., Кусков Ю. М. (1999) Энергетические особенности электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **2**, 51–53.

### References

1. Kuskov, Yu.M., Skorokhodov, V.N., Ryabtsev, I.A. et al. (2001) *Electroslag surfacing*. Moscow, LCC Nauka i Tekhnologii [in Russian].
2. Ponomarenko, V.P., Shvartser, A.Ya., Stroganova, G.V. (1985) Examination of fusion zone of high-chromium cast iron with high-manganese steel in electroslag surfacing. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **11**, 55–58 [in Russian].
3. Latash, Yu.V., Medovar, B.I. (1970) *Electroslag remelting*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Frumin, I.I., Ksendzyk, G.V., Shirin, V.S. (1980) *Machine for electroslag remelting and surfacing*. USA Pat. 4185682.
5. Kuskov, Yu.M. (2013) Electroslag remelting in sectional current-supply mold. *Svarshchik*, **3**, 21–23 [in Russian].
6. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Bogajchuk, I.L. et al. (2015) Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 30–33.
7. Kuskov, Yu.M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding J.*, **4**, 42–45.
8. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (1999) Power specifics of electroslag process in current-carrying mold. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 51–53 [In Russian].

Ю. М. Кусков, В. Г. Соловйов, В. О. Жданов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

### ТОРЦЕВЕ ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДОМ ВЕЛИКОГО ПЕРЕРІЗУ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Торцеве електрошлакове наплавлення запропоновано виконувати з використанням струмопідвідного кристалізатора (СПК) і введенням в його центральну частину, що переплавляється, електрода великого перерізу. При цьому запропоновані дві електричні схеми підключення електрода, що переплавляється. За першою схемою як до електрода, що витрачається, так і кільцевого невитратного (верхня секція СПК), підведений однаковий потенціал. За другою схемою потенціали на обох електродах відрізняються. В результаті проведених на флюсі АНФ-29 дослідних наплавлень в СПК діаметром 180 мм електродами зі сталі 40 діаметром 40...130 мм була запропонована наступна техніка виконання наплавлень. Після наведення в СПК шлакової ванни перший етап (з'єднання основного і наплавленого металів) рекомендується виконувати по першій електричній схемі. При цьому плавлення електрода буде уповільненим, але при оптимальній електричній потужності, що вводиться в шлакову ванну через СПК, можна досягти рівномірного проплавлення основного металу. Надалі, при наплавленні наступних шарів з підвищеною продуктивністю і гарною якістю наплавленого шару слід переходити на другу електричну схему підключення електрода, що переплавляється. Бібліогр. 8, рис. 5.

*Ключові слова:* торцеве електрошлакове наплавлення, електрод великого перерізу, струмопідвідний кристалізатор, електричні схеми електрошлакового наплавлення, проплавлення основного металу, формування наплавленого металу, продуктивність

Yu. M. Kuskov, V.G. Solovjev, V.A. Zhdanov

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

#### ELECTROSLAG SURFACING OF END FACES WITH LARGE-SECTION ELECTRODE IN CURRENT-CONDUCTING MOULD

It is proposed to perform electros slag surfacing of end faces with application of current-conducting mould (CCM) and feeding large-section remelting electrode into its central part. Two variants of electric circuits of remelting electrode connection are proposed. In the first circuit similar potential is applied both to consumable and annular nonconsumable (CCM upper section) electrodes. In the second circuit, potentials at both the electrodes

are different. The following technique of surfacing was proposed as a result of test surfacing performed with ANF-29 flux in CCM of 180 mm diameter with steel 40 electrodes of 40–130 mm diameter. After setting the slag pool in CCM, it is recommended to conduct the first stage (joining the base and deposited metal) with the first electric circuit. Electrode melting will be slower, but with optimum electric power applied to the slag pool through CCM, it is possible to achieve uniform penetration of base metal. Furtheron, at deposition of subsequent layers with higher productivity and good quality of the deposited layer, one should proceed to the second electric circuit of remelting electrode connection. 8 References, 5 Figures.

*Keywords:* end face ESS, large-section electrode; ESS electric circuits, base metal penetration, deposited metal formation, productivity

Поступила в редакцию 20.09.2017

## Гибридные сварочные оболочки для аддитивного производства

При сварке титана и любого другого реакционноспособного металла для введения присадки важно, чтобы зона сварки была очищена от кислорода и азота до уровня, равного  $10^{-5}$  (10 ppm)  $O_2$ .

Благодаря более чем 40-летнему опыту в области производства гибких сварочных оболочек, Huntingdon Fusion Techniques (HFT) расширила свой диапазон по сравнению со стандартными круглыми оболочками, включив изготовление оболочек для охвата объемов 30 м<sup>3</sup> и более для удовлетворения потребностей научно-исследовательских и производственных подразделений на международном уровне.



Ультрафиолетовый стабилизированный, прозрачный полимер с низким давлением паров, используемый для этих оболочек, является жестким и трудно повреждаемым. Для тех случаев, когда может произойти повреждение, существует ремонтный комплект, который входит в комплект поставки всех оболочек с условием, что дополнительные комплекты уже собраны и могут быть отправлены на следующий день, когда это потребуется.

Эти специально разработанные оболочки имеют герметичные молнии, размещенные где угодно, так чтобы они могли использоваться для доступа ко всем точкам входа. Входные точки аргона размещаются на уровне пола, что является хорошей практикой для продувки аргоном с соответствующими точками выхлопа в верхней части. Дополнительные клапанные порты доступны для добавления Weld Purge Monitors®, чтобы информировать пользователей, когда обеспечена сварочная безопасность, чтобы избежать риска окисления расходного материала.

Потолочные перчаточные отверстия встроены на этапе проектирования, и их можно интегрировать в любые требуемые положения вокруг корпусов.

Представляют панели обслуживания, обеспечивающие герметичную подачу всех необходимых шлангов, труб, входов и выходов для обеспечения подачи коммунальных услуг, таких как газ, электроэнергия, вода для обслуживания автоматических и ручных сварочных позиций.

Оболочки были изготовлены до настоящего времени для WAAM (Wire plus Arc Additive Manufacturing), и они подходят для ручной TIG (GTAW), а также для роботизированных методов TIG и лазерного осаждения.

