

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ТОРЦЕВОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКЕ В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ*

В. Г. СОЛОВЬЕВ, Ю. М. КУСКОВ

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

При отсутствии дискретной присадки определенного химического состава появляется задача выполнять торцевую электрошлаковую наплавку электродами большого сечения. При этом одним из главных показателей качества наплавки является получение минимального и равномерного проплавления основного металла. Разработаны основные принципы построения системы автоматического регулирования этих параметров при торцевой электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе. Предложены схемы управления распределением токов в токоподводящем кристаллизаторе, которые позволяют регулировать процесс плавления электрода и, тем самым, косвенно управлять качеством проплавления основного металла. Использовать ту или иную схему для получения качественного биметаллического соединения необходимо с обеспечением регулирования положения торца переплавляемого электрода в шлаковой ванне относительно токоведущей секции кристаллизатора и поддержания расчетного теплового уровня шлаковой ванны. Библиогр. 9, рис. 7.

Ключевые слова: автоматизация, регулирование, проплавление, торцевая электрошлаковая наплавка, токоподводящий кристаллизатор, электрод, проводимость

Разработанный в ЕЭС им. Е. О. Патона способ электрошлаковой наплавки (ЭШН) в токоподводящем кристаллизаторе (ТПК) в наибольшей степени показывает свои преимущества при плавлении в шлаковой ванне различного вида дискретных присадок [1]. Тем не менее, в ряде случаев, например, при отсутствии присадки определенного химического состава, сложности и дороговизны ее изготовления, а также при наличии заготовок, из которых можно относительно просто изготовить переплавляемые электроды, появляется задача выполнять ЭШН, особенно торцевую, электродами большого сечения. Тем более, как показала практика, при определенных условиях такой способ наплавки позволяет достичь повышенной производительности процесса с обеспечением его высокого качества.

Технологии ЭШП с канонической монофазной схемой подключения к источнику питания электрод-поддон хорошо изучены и в большой степени автоматизированы [2, 3], в отличие от ЭШН при торцевой электрошлаковой наплавке в ТПК с верхней токоподводящей секцией. Одним из главных показателей качества наплавки является получение минимального и равномерного проплавления основного металла. Разработке основных принципов построения системы автоматического регулирования этих показателей при

торцевой ЭШН электродом большого сечения и посвящена данная работа.

В последнее время для автоматизации диссипативных систем, к которым относится и ЭШН, все чаще применяют синергетические принципы синтеза [4], стабилизирующие соотношения между переменными состояний процесса. Тем самым достигается вырожденность уравнений динамики процесса ЭШН и наличие интегральных инвариантов многообразий в пространстве его состояний. Инвариантные многообразия представляют собой «некоторые функции, которые во время движения не изменяются». Такие подходы к автоматизации нелинейных объектов значительно упрощают синтез системы. Процессы, происходящие в кристаллизаторе при электрошлаковой наплавке, определяются множеством факторов, которые чаще всего не всегда контролируем оператором с помощью аппаратуры и оцениваются им интуитивно. Причем степень достоверности такой оценки зависит от опытности оператора. Поэтому для решения задачи автоматизации процесса наплавки в ТПК следует найти возможность косвенной оценки значений параметров, необходимых для автоматизации, анализируя электротехнические процессы в кристаллизаторе и токоподводящих цепях.

Большое влияние на повторяемость результатов наплавки может оказывать не только режимы и техника самого электрошлакового процесса, но и изменение электротехнических параметров

* В порядке обсуждения.

электрических цепей вне рабочей зоны кристаллизатора. В частности, на характеристики процесса наплавки влияют длина и расположение кабелей. Например, в случае ЭШН в ТПК диаметром 200 мм при токах до 3 кА и длине кабелей порядка 10 м падение напряжения на них может достигать 15...25 В. Кроме того, необходимо учитывать наличие «вентильного эффекта» в шлаковой ванне [5], который вносит нелинейность и искажает форму синусоиды при подключении источников питания переменного тока [6, 7]. Этот же эффект необходимо принимать во внимание при выборе полярности подключения к кристаллизатору источников постоянного тока.

Топология электрических схем подключения ТПК. На рис. 1 представлены схема ЭШН в ТПК с одним источником питания и ее электрическая схема замещения.

Существует возможность автоматически контролировать электрические параметры токоподводящих элементов, которые определяют рабочую зону кристаллизатора (РЗК), т. е. токоведущую секцию кристаллизатора, шлаковую ванну, электрод и поддон. Следует измерять напряжение между электродом и токоведущей секцией кристаллизатора $U_{э-к}$, электродом и поддоном $U_{э-п}$, токоведущей секцией кристаллизатора и поддоном $U_{к-п}$, ток кристаллизатора I_k , ток электрода $I_э$ и ток поддона $I_п$. Однако указанные параметры сами по себе не являются представительными для того, чтобы охарактеризовать процесс. Требуется более обобщенные, комплексные параметры, имеющие более высокую корреляционную связь с протекающими в рабочей зоне кристаллизатора процессами, являющиеся «интегральными инвариантами

многообразий» протекающих термодинамических и электрохимических процессов в РЗК.

Независимо от схемы подключения источника (источников) к токоподводящим элементам рабочей зоны в соответствии с первым законом Кирхгофа, всегда один из токов (суммарный ток, обозначим его $I_{сум}$) будет определяться суммой двух других токов (слагаемых токов, обозначим их $I_{сл}$).

Например, если $I_э$ является $I_{сум}$, то I_k и $I_п$ являются $I_{сл}$. Исходя из такого представления электрических связей входов и выходов рабочей зоны можно говорить о параметрах, которые в определенной степени характеризуют внутренние процессы в кристаллизаторе, а именно — это электрическая проводимость условных внутренних каналов рабочей зоны кристаллизатора по каналам, относящимся к $I_{сл}$. В нашем примере это проводимости $G_{э-к} = I_k/U_{э-к}$ и $G_{э-п} = I_п/U_{э-п}$ (рис. 1, б). Естественно, что направления токов здесь не учитываются и значения токов и напряжений берутся по модулю. На рис. 2 изображено векторное поле электрической напряженности и поле эквипотенциальных поверхностей в РЗК в двухкоординатном представлении, полученное путем электростатического моделирования [8] в среде PDETool MatLab. Изображение демонстрирует разделение потока электрической энергии, идущей от электрода, на два потока (условных внутренних каналов РЗК) — электрод–токоведущая секция кристаллизатора и электрод–поддон.

При такой интерпретации внутренних электрических связей элементов рабочей зоны наплавки, кристаллизатор будет являться трехполюсником. Если используется схема наплавки с одним источником питания, то кристаллизатор, за счет электрического соединения каких-либо двух (из трех)

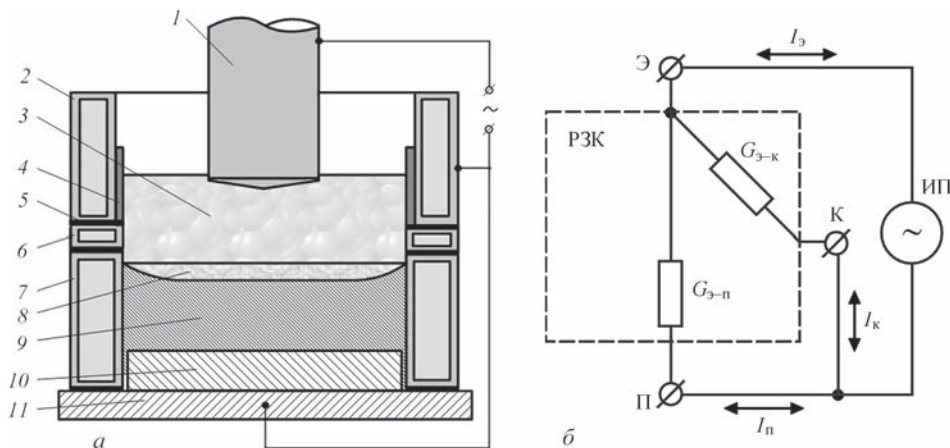


Рис. 1. Схема ЭШН в ТПК: а — с одним источником питания (1 — электрод; 2, 6, 7 — токоведущая, промежуточная и формирующая секции кристаллизатора, соответственно; 3 — шлаковая ванна; 4 — защитная футеровка; 5 — изоляционная прокладка; 8 — металлическая ванна; 9 — наплавленный металл; 10 — изделие; 11 — поддон); б — электрическая схема замещения (ИП — источник питания с жесткой характеристикой; Э, К и П — клеммы подключения электрода, токоведущей секции кристаллизатора и поддона, соответственно; $I_э$, I_k и $I_п$ — ток, протекающий через электрод, токоведущую секцию кристаллизатора и поддон, соответственно; $G_{э-к}$ и $G_{э-п}$ — электрическая проводимость между клеммами Э и К, а также Э и П, соответственно)

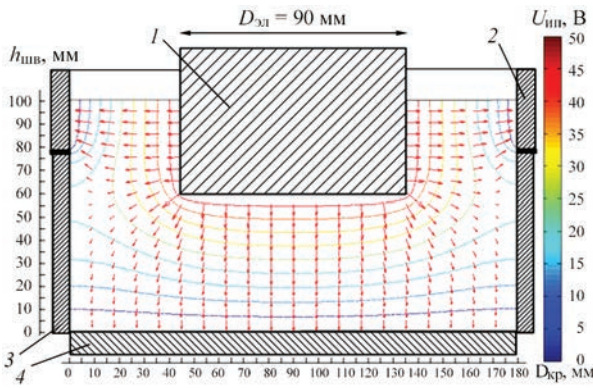


Рис. 2. Векторное поле электрической напряженности и поле эквипотенциальных поверхностей в РЗК: 1 — электрод; 2, 3 — токопроводящая и формирующая секции кристаллизатора; 4 — поддон; $D_{эл}$ — диаметр электрода; $D_{кр}$ — внутренний диаметр кристаллизатора; $h_{шв}$ — глубина шлаковой ванны; $U_{шв}$ — напряжение источника питания

элементов (полюсов), преобразуется в двухполюсник, к клеммам которого подключается источник.

Проводимость условного «внутреннего» канала рабочей зоны характеризует физико-химическое состояние «среды канала». «Среда канала» — это условное представление среды, через которую протекает ток между соответствующими входами/выходами, т. е. токоподводящими элементами рабочей зоны кристаллизатора. Ток может протекать через электрод или заготовку, через шлак, через охлаждаемые стенки кристаллизатора, через наплавленный металл и через поддон. Проводимость каждой из перечисленных составляющих среды зависит от температуры соответствующих частей электрода, зон шлаковой ванны и многого другого. Оператор, задавая начальные параметры наплавки, такие как марки используемых материалов, диаметр электрода, скорость его погружения в шлаковую ванну и напряжение источника питания, может формировать среду канала и, тем самым, изменять характер его проводимости. При этом изменение напряжения, приложенного к каналу, не изменит его проводимости в допустимо длительном истечении времени, пока изменение напряжения не приведет к изменению свойств самой среды. В свою очередь, введение в шлаковую ванну электрода или заготовки, имеющих высокую проводимость и температуру, отличающуюся от температуры шлака, приведет к резкому изменению свойств ванны, а значит к изменению проводимости каналов. Таким образом, в определенном смысле можно считать, что проводимости внутренних каналов рабочей зоны наплавки являются комплексными параметрами, характеризующими процесс наплавки в ТПК.

Положение электрода в шлаковой ванне влияет на проводимости каналов и, в случае поддержания температуры шлака неизменной, по соотношению проводимостей каналов можно косвенно

судить о местоположении торца плавящегося электрода в шлаковой ванне. При этом проводимости каналов могут быть автоматически контролируемы и регулируемы для обеспечения целей автоматизации. Регулирование скорости подачи электрода по соотношению проводимостей каналов обеспечит заданное местоположение торца плавящегося электрода в шлаковой ванне.

Еще один из комплексных параметров — это потребляемая мощность. Температурный режим процесса наплавки определяется потребляемой мощностью подводимой электроэнергии к соответствующему каналу, т. е. для нашего примера $P_{э-к} = I_k U_{э-к}$ и $P_{э-п} = I_{п} U_{э-п}$. Регулирование потребляемой мощности позволяет управлять температурным режимом и производительностью процесса наплавки. Автоматический контроль потребляемой мощности подводимой электроэнергии доступен, а изменение потребляемой мощности в обоих каналах до заданного значения достигается изменением напряжения источника. Поддержание заданного соотношения проводимостей в обоих каналах и заданной мощности подводимой электроэнергии к соответствующему каналу дает возможность обеспечить качественные характеристики наплавленного слоя и зоны сплавления.

Рассмотрим схему подключений элементов рабочей зоны наплавки, представленной на рис. 1, б. Если предположить, что для этой схемы в результате множества экспериментов удалось определить оптимальные для технологических целей значения проводимости и потребляемой мощности канала электрод–кристаллизатор, например $G_{э-к}^{опт} = I_k^{опт} / U_{э-к}^{опт}$ и $P_{э-к}^{опт} = I_k^{опт} U_{э-к}^{опт}$, то путем небольших преобразований получаем $U_{э-к}^{опт} = \sqrt{P_{э-к}^{опт} / G_{э-к}^{опт}}$. Т. е. оператор или автоматическая система должны иметь возможность в процессе наплавки поддерживать значение $U_{э-к}^{опт}$ (при этом предполагается, что скорость подачи электрода поддерживается постоянной при ее оптимальном значении). Отсюда следует, что для целей автоматического регулирования процесса наплавки напряжение источника питания должно быть плавно изменяемым и в необходимых пределах. Кроме того, требуется обеспечить контроль и управление перемещением электрода при неподвижном кристаллизаторе или, наоборот, кристаллизатора при неподвижном электроде, с достаточной точностью и в необходимом диапазоне для поддержания $U_{э-к}^{опт}$ в соответствии с технологическими требованиями.

Предполагается, что для определенных заданных начальных условий наплавки существует единственное оптимальное решение по изменению во времени скорости перемещения электрода, а также соответствующее решение по изменению

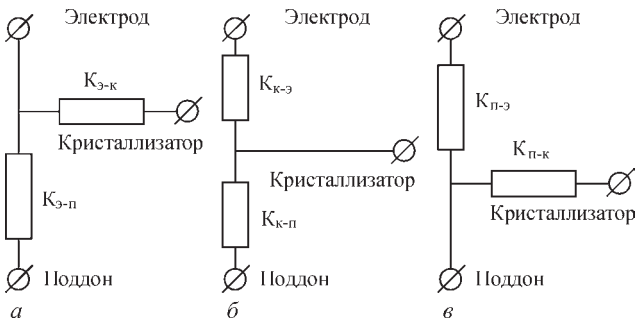


Рис. 3. Типы схем каналов рабочей зоны наплавки: а — «Э»; б — «К»; в — «П» ($K_{Э-к}$ — канал «электрод-кристаллизатор»; $K_{Э-п}$ — «электрод-поддон»; $K_{к-Э}$ — «кристаллизатор-электрод»; $K_{к-п}$ — «кристаллизатор-поддон»; $K_{п-Э}$ — «поддон-электрод»; $K_{п-к}$ — «поддон-кристаллизатор»)

во времени напряжения источника (на заданном отрезке времени). В результате реализации такого решения можно достичь прогнозируемого качества наплавки с заданными значениями производительности и энергоэффективности. Поиск указанного «оптимального» решения должна осуществлять система управления путем автоматического накопления данных о каждой наплавке.

Исходя из представлений о рабочей зоне кристаллизатора, изложенных выше, можно формализовать типы каналов в рабочей зоне. Существует три типа схем каналов рабочей зоны наплавки в ТПК (рис. 3), обозначенные как «Э», «К», и «П». Они отличаются местоположением общих клемм рабочей зоны (общая клемма соответствует входу/выходу, по которому протекает суммарный ток $I_{сум}$). В данной интерпретации каналом рабочей зоны наплавки в ТПК является путь между элементами этой зоны, соединенными резистором. Проводимость резистора и является проводимостью канала.

В связи с тем, что токоподводящих элементов рабочей зоны три, то количество вариантов подключения источников питания тоже три, так как источник подключается к паре элементов зоны. Подключить оставшуюся третью клемму можно только по двум вариантам — к одной или другой клемме источника. На рис. 4 в качестве примера показаны схемы подключения элементов рабочей зоны к источнику питания переменного тока. Схе-

мы подключения к источнику постоянного тока аналогичны.

Таким образом, для рассмотрения предлагаются три варианта схем подключения источника к кристаллизатору. Наиболее перспективными, для повышения производительности наплавки, являются схемы типа «Э» и, в меньшей степени, «К», так как опыт показывает, что наилучшее плавление электрода происходит при достаточно больших токах, протекающих через электрод и кристаллизатор, тем самым обеспечивая высокую производительность процесса. В отличие от схемы типа «П», которая характеризуется большим током, протекающим через поддон, малой скоростью расплавления электрода, но хорошим и равномерным проплавлением основного металла.

Следовательно, при выборе схемы подключения источника к токоподводящим элементам рабочей зоны требуется в первую очередь ориентироваться на выбор типа схемы каналов, т. е. на то, какие клеммы должны быть электрически закорочены. Геометрия рабочей зоны кристаллизатора во многом определяет этот выбор.

На первом этапе разработки системы в качестве автоматизируемых выбраны следующие функции:

- функция выбора и поддержания электрического режима для формирования сплавления разнородных металлов с заданной относительной неравномерностью проплавления и минимальной средней глубиной проплавления;
- функция выбора и поддержания электрического режима для обеспечения стабильных условий кристаллизации наплавляемого металла.

Выбор того или иного электрического режима осуществляется оператором из числа предоставляемых системой. Система строится таким образом, чтобы история наплавки накапливалась и сохранялась в памяти компьютера. Из того, что находится в памяти компьютера, оператор может выбрать необходимый режим или создать новый с последующим запоминанием. После выбора режима и запуска системы «в работу» система выполняет функцию стабилизации заданных пара-

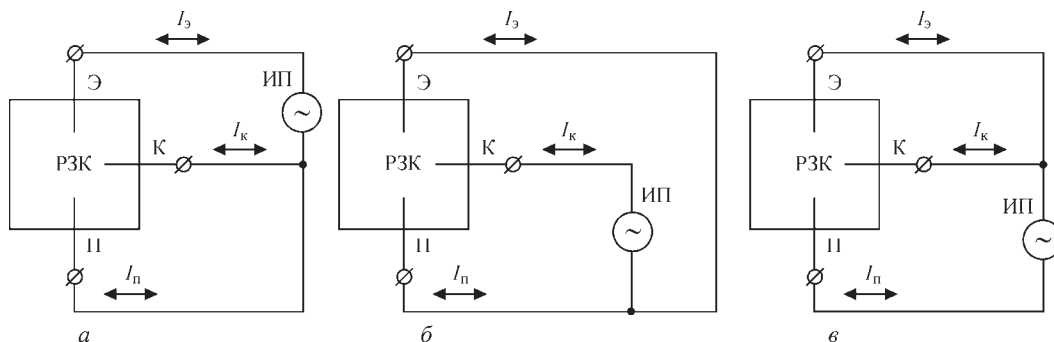


Рис. 4. Типы схем подключения элементов рабочей зоны наплавки к источнику питания переменного тока: а — «Э»; б — «К»; в — «П»

метров в заданном диапазоне. Значения заданных параметров и диапазон стабилизации не являются постоянными и определяются выбранным режимом.

При автоматизации режима формирования сплавления разнородных металлов с заданной относительной неравномерностью проплавления и минимальной средней глубиной проплавления, необходимо стабилизировать заданную величину заглупления электрода и заданное напряжение источника при подключении источника к ТПК по схеме «П».

При автоматизации обеспечения стабильных условий кристаллизации наплавляемого металла необходимо стабилизировать заданное значение проводимости канала электрод–поддон и заданное напряжение источника при подключении источника к ТПК по схеме «Э».

Именно такой подход выполнения электрошлаковой наплавки был предложен в работе [9] на основании оценки продольных шлифов биметаллических заготовок.

Концептуально, при разработке системы автоматического управления ЭШН в ТПК должны быть выполнены следующие функции и задачи:

- контроль и индикация текущих значений скорости перемещения плавящегося электрода, напряжения источника питания, токов наплавки, проходящих через электрод, кристаллизатор и поддон;
- обеспечение наличия устройств, задающих значения параметров режима, индикацию заданного типового режима наплавки;
- контроль и индикацию значений вычисляемых параметров (величина заглупления электрода, производительность наплавки, время протекания процесса и т. п.);
- математическое моделирование и экспериментальные исследования зависимостей глубины и равномерности проплавления от величины заглупления электрода и потребляемой токоподводящим кристаллизатором мощности;
- автоматическое управление перемещением электрода;
- автоматическое управление напряжением, током и потребляемой мощностью наплавки.

Структурная схема автоматизации проплавлением основного металла при ЭШН в ТПК представлена на рис. 5. Система состоит из блока «Ввод аналоговых сигналов», предназначенного для ввода в систему сигналов напряжения наплавки U_n и токов $I_э$, $I_п$, $I_к$, т. е. электрода, поддона и кристаллизатора, соответственно, поступающие от датчиков, находящихся в непосредственной близости от «Токоподводящего кристаллизатора». Блок «Вывод аналоговых сигналов» предназна-

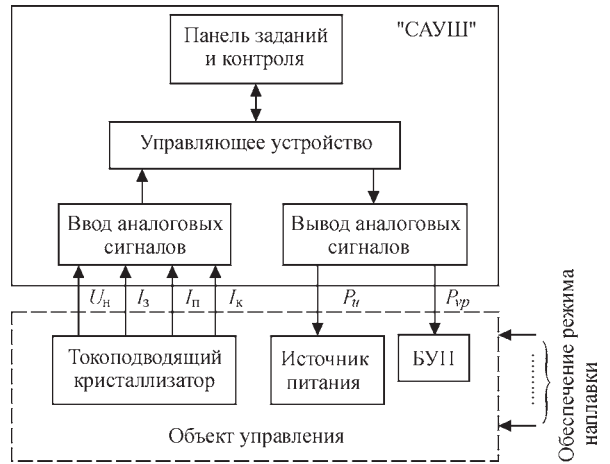


Рис. 5. Структурная схема автоматизации проплавлением основного металла при ЭШН в ТПК

чен для вывода управляющих сигналов P_u — датчик выходного напряжения «Источника питания» и P_{vp} — датчик скорости перемещения расходуемого электрода, который воздействует на блок управления приводом механизма перемещения электрода «БУП». «Панель заданий и контроля» предназначена для ручного ввода и индикации дискретной, цифровой, текстовой информации и автоматического ввода указанной информации в «Управляющее устройство», а также приема из него сигналов для индикации на самой «Панели заданий и контроля». «Управляющее устройство» производит прием аналоговых сигналов от «Объекта управления» и дискретных сигналов от «Панели заданий и контроля», производит математическую обработку этих сигналов и формирует дискретные сигналы для передачи в «Панель заданий и контроля» для индикации, а также управляющие аналоговые сигналы для «Объекта управления». Кроме того, осуществляет запись истории наплавки для неизученных видов и режимов наплавки, с целью дальнейшей обработки записанных массивов информации и модернизации программного обеспечения системы, формирует массив аппроксимирующих регрессионных функций для видов и режимов наплавки, предусмотренных в системе, а также массив историй наплавки.

На данном этапе «Управляющее устройство» реализовано на ноутбуке LENOVO модель IdealPad Y560 с 64-разрядной операционной системой. Ввод аналоговой информации производится с помощью внешнего АЦП E14-140-M L-CARD (шина USB2), который особенно удобен для создания портативных измерительных систем на базе ноутбука. Он имеет программно-управляемую настройку параметров сбора данных: количество и последовательность опроса входных каналов, диапазонов измерения, частоты аналого-цифрового преобразования. В качестве норми-

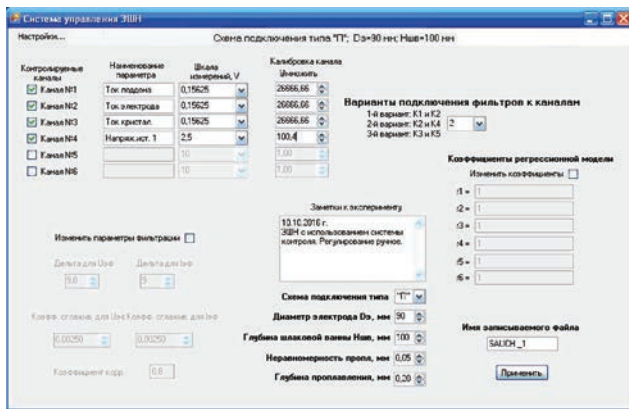


Рис. 6. Вид экрана компьютера при начальной настройке системы управления ЭШН перед наплавкой

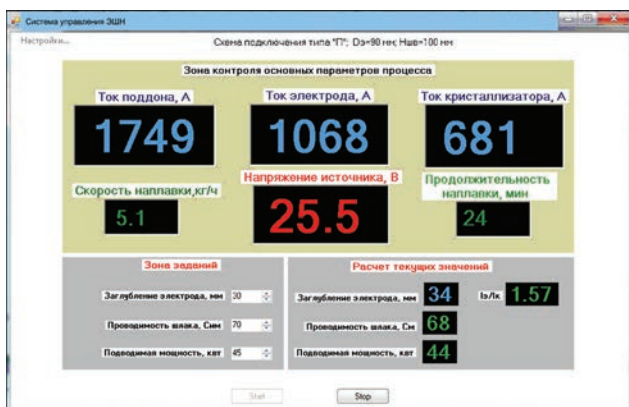


Рис. 7. Вид экрана компьютера при работе системы в режиме контроля, управления и регистрации процесса наплавки

рующих преобразователей сигналов тока и напряжения использовано оригинальное нестандартное устройство собственной разработки.

Осуществлялось «ручное» регулирование по рассчитанным системой показателям. Вручную поддерживалась скорость подачи электрода с целью стабилизации величины заглубления электрода в шлаковую ванну, а также значение напряжения источника.

На рис. 6 представлен вид экрана компьютера при начальной настройке системы управления ЭШН перед наплавкой. Задаются параметры ввода и фильтрации входных сигналов, технологические условия предстоящей наплавки, тип схемы подключения источника к ТПК и т. п.

На рис. 7 представлен вид экрана компьютера при работе системы в режиме контроля, управления и регистрации процесса наплавки. Значения напряжения источника, токов поддона, кристаллизатора и электрода отображаются на экране в реальном режиме времени с частотой представления 1 Гц. Скорость наплавки и продолжительность наплавки представляются с периодичностью 1 мин. Расчетные текущие значения параметров процесса индицируются с периодичностью 5 с.

Выводы

1. Разработаны основные принципы построения системы автоматического регулирования проплавлением основного металла при торцевой электрошлаковой наплавке электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. Разработана пилотная версия компьютерной системы автоматического управления ЭШН в ТПК.

2. Исходя из представлений о рабочей зоне кристаллизатора, для использования предложены на выбор технолога три схемы распределения тока в рабочей зоне наплавки, обозначенные как «Э», «К» и «П», которые определяют процесс плавления электрода и величину проплавления основного металла.

3. Определены основные контролируемые комплексные параметры в системе — это электрическая проводимость каналов и потребляемая ими мощность. Используя их, можно косвенным путем определять положение торца плавящегося электрода в шлаковой ванне и управлять процессом электрошлаковой наплавки, изменяя скорости опускания электрода и напряжения источника питания. В результате — обеспечить минимальное и равномерное проплавление основного металла, стабилизацию процесса наплавки с заданными значениями производительности и энергоэффективности.

Список литературы

1. Кусков Ю. М., Гордань Г. Н., Богайчук И. Л., Кайда Т. В. (2015) Электрошлаковая наплавка дискретным материалом различного способа изготовления. *Автоматическая сварка*, 5-6, 34–37.
2. Моисеев В. В., Закамаркин М. К., Лоиферман М. А., Четвертных В. В. (2001) Один миллион стали ЭШП выплавлен с использованием ЭВМ. *Проблемы спец. электрометаллургии*, 3, 15–18.
3. Троянский А. А., Рябцев А. Д., Самборский М. В., Мастепан В. Ю. (2002) Использование измерительной информационной системы для исследования процесса ЭШП. *Металл и литье Украины*, 7-8, С.25–26.
4. Владимирский Э. И., Исмаилов Б. И. (2011) *Синергетические методы управления хаотическими системами*. Баку, ELM.
5. Дудко Д. А., Рублевский И. Н. (1962) К вопросу о природе вентильного эффекта при электрошлаковом процессе. *Автоматическая сварка*, 4, 40–48.
6. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Жданов В. А. (2017) Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Там же*, 1, 40–45.
7. Миронов Ю. М. (2002) Влияние рода тока на процессы в электрошлаковых установках. *Электрометаллургия*, 4, 25–32.
8. Соловьев В. Г., Кусков Ю. М. (2018) Оценка влияния технологических и электрических параметров ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе на скорость плавления электрода и проплавление. *Автоматическая сварка*, 6, 24–32.
9. Кусков Ю. М., Соловьев В. Г., Осечков П. П., Осин В. В. (2018) Электрошлаковая наплавка электродом большого сечения на постоянном токе в токоподводящем кристаллизаторе. *Там же*, 3, 38–42.

References

1. Kuskov, Yu.M., Gordan, G.N., Ereemeeva, L.T. et al. (2015) Effect of magnetic-pulsed treatment of filler materials on deposited metal structure. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 121-123.
2. Moiseev, V.V., Zakamarkin, M.K., Loiferman, M.A., Chetvertnykh, V.V. (2001) One million of steel ESR was melted using computer. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 15-18 [in Russian].
3. Troyansky, A.A., Ryabtsev, A.D., Samborsky, M.V., Mastepan, V.Yu. (2002) Application of information measurement system for study of ESR process. *Metall i Lityo Ukrainy*, **7-8**, 25-26 [in Russian].
4. Vladimirovsky, E.I., Ismajlov, B.I. (2011) *Synergetic methods of control of chaotic systems*. Baku, ELM [in Russian].
5. Dudko, D.A., Rublevsky, I.N. (1962) To problem of nature of barrier effect during electrosag process. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 40-48 [in Russian].
6. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Zhdanov, V.A. (2017) Electrosag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **2**, 29-32.
7. Mironov, Yu.M. (2002) Influence of nature of current on processes in electrosag installations. *Elektrometallurgiya*, **4**, 25-32 [in Russian].
8. Soloviov, V.G., Kuskov, Yu.M. (2018) Influence of technological and electrical parameters of ESS in current-supplying mould on electrode melting rate and base metal penetration. *The Paton Welding J.*, **6**, 20-27.
9. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Osechkov, P.P., Osin, V.V. (2018) Electrosag surfacing with large-section electrode at direct current in current-supplying mould. *Ibid.*, **3**, 32-35.

КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ У СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

В. Г. СОЛОВІЙОВ, Ю. М. КУСКОВ

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

При відсутності дискретної присадки певного хімічного складу з'являється задача виконувати торцеве електрошлакове наплавлення електродами великого перерізу. При цьому одним із головних показників якості наплавлення є отримання мінімального та рівномірного проплавлення основного металу. Розроблено основні принципи побудови системи автоматичного регулювання цих параметрів при торцевому електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі. Запропоновано схеми управління розподілом струмів в струмопідвідному кристалізаторі, які дозволяють регулювати процес плавлення електрода і, тим самим, непрямо управляти якістю проплавлення основного металу. Використовувати ту чи іншу схему для отримання якісного біметалічного з'єднання необхідно із забезпеченням регулювання положення торця переплавленого електрода в шлаковій ванні відносно струмоведучої секції кристалізатора та підтримувannya розрахункового теплового рівня шлакової ванни. Бібліогр. 9, рис. 7.

Ключові слова: автоматизація, регулювання, проплавлення, торцеве електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, електрод, провідність

CONTROL OF THE PROCESS OF BASE METAL PENETRATION AT END FACE ELECTROSLAG SURFACING IN CURRENT-SUPPLYING MOULD

V.G. SOLOVYEV, Yu.M. KUSKOV

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

In the absence of discrete filler of a certain chemical composition, there appears the task of performing end face electrosag surfacing with large-section electrodes. Here, one of the main surfacing quality characteristics is achieving minimum and uniform penetration of the base metal. Main principles of construction of the system of automatic regulation of these parameters at end face electrosag surfacing in a current-supplying mould were developed. Schemes of control of current distribution in the current-supplying mould are proposed, which allow regulation of the process of electrode melting, and, thus, indirect control of the quality of base metal penetration. A particular scheme should be used to produce a sound bimetal joint with provision of regulation of the position of remelted electrode end face in the slag pool relative to the current-conducting section of the mould and maintaining the calculated heat level of the slag pool. 9 Ref., 7 Fig.

Keywords: automation, regulation, penetration, end face electrosag surfacing current-supplying mould, electrode, conductivity

Поступила в редакцію 15.03.2018