

# ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭШН В ТОКОПОДВОДЯЩЕМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ НА СКОРОСТЬ ПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА И ПРОПЛАВЛЕНИЕ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

**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](mailto:office@paton.kiev.ua)

Проведен вычислительный эксперимент, который показал, что контролируемые электрические показатели процесса ЭШН можно использовать для регулирования формы металлической ванны и скорости плавления электрода. Определены зависимости между величиной заглибления электрода в шлаковую ванну, средней глубиной проплавления и равномерностью проплавления основного металла относительно средней глубины проплавления. Предложен способ расчета величины заглибления электрода в шлаковую ванну по соотношению токов в ТПК. Проведен сравнительный анализ трех типов одноконтурных схем подключения кристаллизатора к источнику питания и предложена оптимальная схема для требуемых критериев качества наплавки. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 12.

*Ключевые слова:* токоподводящий кристаллизатор, эксперимент, автоматизация, металлическая ванна, регулирование, проплавление, поддон, электрод, проводимость, схема питания

Электростатическое поле, создаваемое разностью потенциалов между токоведущими частями кристаллизатора, является неоднородным в связи со сложной конфигурацией внутренних элементов кристаллизатора и взаимным их расположением, даже если допустить, что вращение жидкой шлаковой ванны обеспечивает гомогенизацию ее свойств. В первую очередь на форму эквипотенциальных поверхностей поля влияет величина заглибления электрода в шлаковую ванну, его диаметр и форма, а также используемый тип схемы подключения токоподводящего кристаллизатора (ТПК) к источнику питания. Напряженность электрического поля в каждой точке шлаковой ванны определяет силу и направление потоков электрической энергии, что, в свою очередь, обуславливает распределение тепловой энергии при ЭШН, влияет на характер плавления электрода, равномерность и среднюю глубину проплавления изделия, а также на характер кристаллизации жидкого металла. Вопросам математического моделирования электрических параметров электрошлаковых процессов было уделено внимание во многих работах, например [1–4], однако работы по моделированию и изучению влияния электрических параметров на равномерность и среднюю глубину проплавления изделия при ЭШН в токоподводящем кристаллизаторе практически отсутствуют.

В работе [5] в результате моделирования электрического поля в шлаковой ванне в ТПК на электропроводной бумаге авторами сделано заключение, что средняя секция кристаллизатора

благодаря своей электропроводности шунтирует часть шлаковой ванны, смещает зону преимущественного тепловыделения в пристеночную область кристаллизатора, оставляя относительно холодной центральную зону. Однако непосредственно у самой стенки кристаллизатора металлическая ванна остается холодной за счет водяного охлаждения кристаллизатора и вследствие этого ванна может приобретать специфическую форму «сомbrero».

Авторы работы [6] делают вывод, что варьируя значениями токов, идущих на электрод и кристаллизатор при наплавке с использованием «потенциального» электрода, можно существенно изменять форму дна металлической ванны – от вогнутой конусообразной, характерной для обычного процесса ЭШП, до выпуклой в центральной части наплавленного слоя, присущей наплавке без электрода.

Цель работы — выполнение математического моделирования распределения потенциала шлаковой ванны в ТПК с использованием пакета PDETool MATLAB и проведение вычислительного эксперимента, который даст ответы на вопросы:

- как использовать контролируемые электрические параметры для регулирования формы металлической ванны и скорости плавления электрода;
- каким образом значение величины заглибления электрода в шлаковую ванну влияет на среднюю глубину проплавления изделия и равномерность проплавления относительно средней глубины проплавления;

– как использовать значения контролируемых электрических параметров для расчета величины заглибления электрода в шлаковую ванну;

– какая одноконтурная схема (из трех типов) подключения кристаллизатора к источнику питания является наиболее оптимальной для решения поставленной задачи;

– в каких случаях необходимо использовать схему питания ТПК — одно- либо двухконтурную.

Одной из стандартных краевых задач в PDETool [7] является электростатическая задача, которая была использована в данной работе, поскольку предметом исследования являлось распределение напряженности электрического поля в шлаковой ванне между поверхностями электрода, графитовой футеровки токоведущей секции кристаллизатора и поддона, к которым подведен потенциал.

В предлагаемой постановке задачи принято, что объект имеет осевую симметрию, поэтому двухмерная модель представлена в цилиндрической системе координат, причем вращение жидкой шлаковой ванны вокруг оси кристаллизатора обеспечивает аксиальную гомогенизацию ее свойств. При этом считаем, что существует качественное влияние электростатического поля и его неравномерности вблизи поверхности поддона (изделия) на неравномерность и глубину проплавления верхнего слоя изделия в соответствии с законом Ленца–Джоуля. Граничные условия поверхности шлаковой ванны и формирующей секции кристаллизатора приняты в соответствии с условиями задачи Неймана, а для границ поверхностей электрода, графитовой втулки кристаллизатора и поддона в соответствии с условиями задачи Дирихле.

Принятая модель и проведенный вычислительный эксперимент не претендуют на получение численных взаимосвязей входных и выходных переменных, которые могли бы быть использованы при наплавке, но позволяют оценить качественную взаимосвязь указанных переменных, правильно спланировать и упростить проведение экспериментальных наплавов для получения количественных взаимосвязей.

Уравнением электростатики относительно скалярного электрического потенциала является

$$-\operatorname{div}(\epsilon \nabla V) = \rho / \epsilon_0,$$

где  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (основная электрическая постоянная);  $V$  — скалярный электрический потенциал;  $\rho$  — скалярное поле объемной плотности электрического заряда.

Значение относительной диэлектрической проницаемости шлака принято  $\epsilon = 70$ . В связи с от-

сутствием в литературных источниках данных по этому параметру значение  $\epsilon$  приравнено к относительной диэлектрической проницаемости морской воды. Для решения краевой задачи Дирихле  $r = hV$  (где  $r$  — электрический потенциал;  $h$  — весовой коэффициент) принято значение  $h = 1$ , а значение скалярного электрического потенциала  $V = 100$  условных единиц, что обеспечивает оценку напряжений между эквипотенциальными линиями в процентном соотношении. Для решения краевой задачи Неймана  $\epsilon \nabla V + qV = g$ ;  $q$  — коэффициент, определяющий влияние значения  $V$  в модели, принимается равным 0,7, а  $g$  — заряд на боковых поверхностях формирующей секции кристаллизатора, принимается равным  $<10^{-10}$  Кл, т. е.  $g = 0$ . Для шлаковой ванны  $\rho = 0$ . Визуализация скалярных эллиптических PDE позволила использовать «метод графических изображений», который успешно применяется в расчете полей заряженных тел, находящихся вблизи плоских или цилиндрических проводящих поверхностей [8].

**Постановка задачи.** В результате моделирования необходимо определить характер влияния на контролируемые электрические параметры ЭШН в ТПК величины диаметра электрода  $d_3$ , заглибления  $h_3$  электрода в шлаковую ванну, уровня металлической ванны  $h_m$  относительно уровня нижней кромки токоведущей секции кристаллизатора.

Геометрические характеристики и константы модели:

– внутренний диаметр формирующей части кристаллизатора 180 мм;

– электрод цилиндрический диаметром  $d_3$ : 40 мм (а), 90 (б) и 130 (в);

– кристаллизатор двухсекционный (без средней секции);

– высота графитовой футеровки, смоченной шлаком (мокрая часть), 20 мм;

– расстояние от нижнего края графитовой футеровки до зеркала металлической ванны  $h_m$ : 30 мм (а), 50 (б) и 80 (в). Глубина шлаковой ванны соответственно  $h_{ш}$ : 50 мм (а), 70 (б) и 100 (в).

– величина заглибления электрода в шлаковую ванну  $h_3$ : 10 мм (а), 20 (б) и 40 (в).

На рис. 1 представлены примеры моделей электростатических полей для ТПК с различными схемами подключений к источнику, различными диаметрами электродов, с различными глубинами шлаковой ванны и различными величинами заглибления электрода.

Существует три типа схем подключения элементов рабочей зоны кристаллизатора (РЗК) к источнику питания (ИП) — схема с использованием «потенциального» электрода (тип «Э») на рис. 2, а, схема с использованием «потенциального» кристаллизатора (тип «К») на рис. 2, б и схема

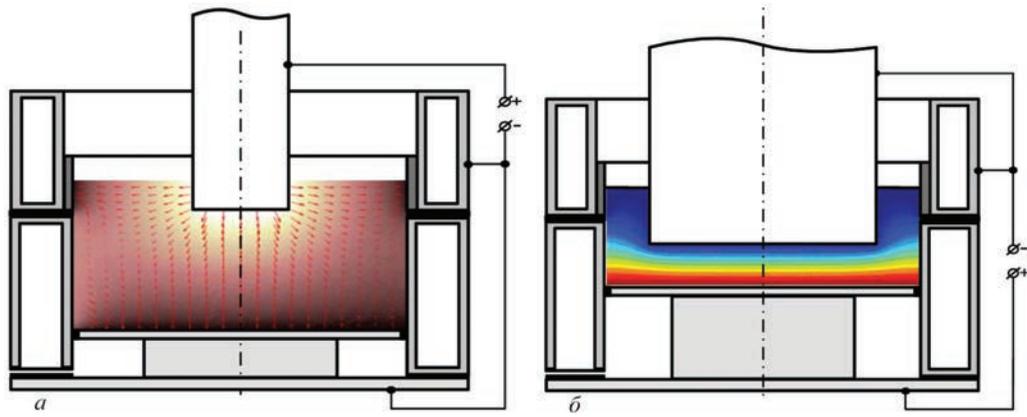


Рис. 1. Примеры расчета напряженности электрического поля и поля с эквипотенциальными линиями: *a* — для ТПК, включенного по схеме с «потенциальным» электродом,  $d_3 = 40$  мм,  $h_{ш} = 100$  мм и  $h_3 = 20$  мм; *б* — для ТПК, включенного по схеме с «потенциальным» поддоном,  $d_3 = 130$  мм,  $h_{ш} = 70$  мм и  $h_3 = 40$  мм

с использованием «потенциального» поддона (тип «П») на рис. 2, *в*.

**Расчеты токов поддона, электрода и кристаллизатора при схеме с использованием «потенциального» поддона (тип «П»).** При схеме питания ТПК типа «П» через поддон проходит наибольший ток, который равен сумме токов, протекающих через электрод и кристаллизатор. Таким образом, обеспечивается наилучший прогрев изделия, но эффективность расплавления электрода ниже, чем, например, при подключении ТПК к источнику по схеме с «потенциальным» электродом (тип «Э»).

На рис. 3 приведены расчетные значения токов поддона  $I_{п}$ , электрода  $I_3$  и кристаллизатора  $I_к$  в зависимости от величины заглубления электрода  $h_3$  и от диаметра электрода  $d_3$ , при глубине шлаковой ванны  $h_{ш} = 100$  мм.

Как видно из графика рис. 3, *а*, ток электрода  $I_3$  при заглублении в шлаковую ванну увеличивается практически пропорционально величине заглубления, так как проводимость шлаковой ванны увеличивается при увеличении площади «мокрой» части электрода и расстояния от электрода до изделия, а также при увеличении  $d_3$ . Ток кристаллизатора  $I_к$  при заглублении электрода уменьшается,

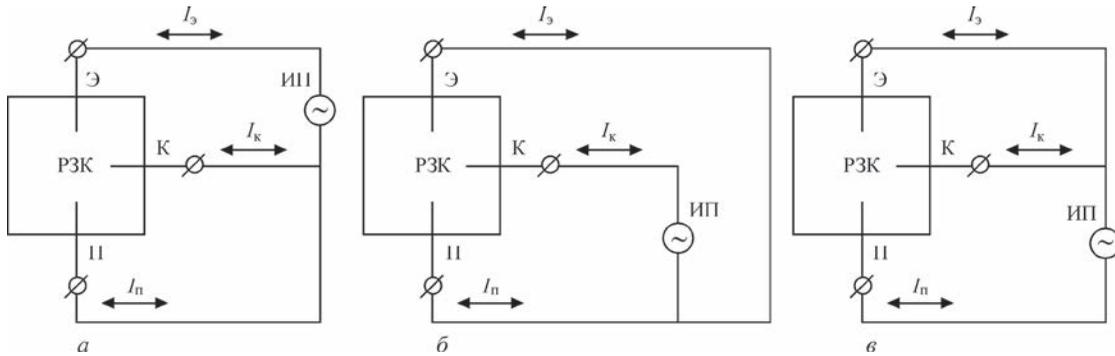


Рис. 2. Схемы подключения элементов рабочей зоны кристаллизатора к источнику питания с использованием: *a* — потенциального электрода (тип «Э»); *б* — потенциального кристаллизатора (тип «К»); *в* — потенциального поддона (тип «П»)

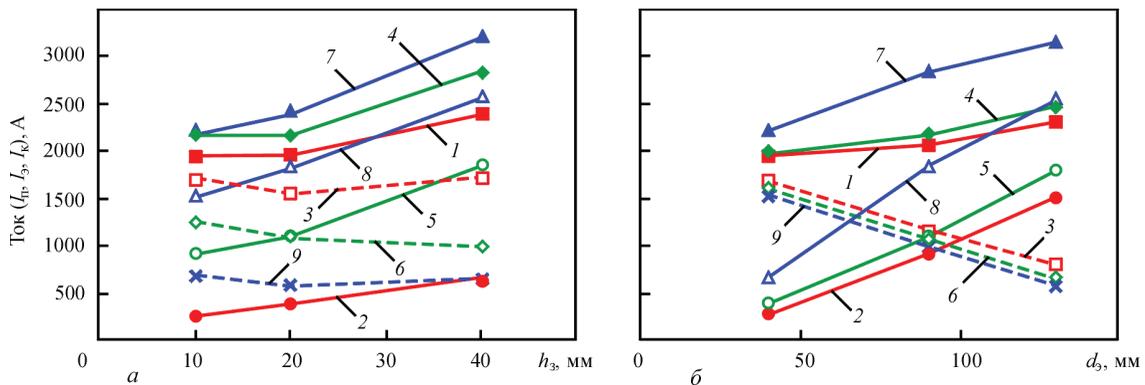


Рис. 3. Изменения токов поддона  $I_{п}$ , электрода  $I_3$  и кристаллизатора  $I_к$  в зависимости от: *a* — величины заглубления электрода  $h_3$ : 1, 2, 3 —  $I_{п}$ ,  $I_3$ ,  $I_к$ , соответственно (при  $d_3 = 40$  мм); 4, 5, 6 —  $I_{п}$ ,  $I_3$ ,  $I_к$ , соответственно (при  $d_3 = 90$  мм); 7, 8, 9 —  $I_{п}$ ,  $I_3$ ,  $I_к$ , соответственно (при  $d_3 = 130$  мм); *б* — диаметра электрода  $d_3$ , при глубине шлаковой ванны  $h_{ш} = 100$  мм: 1, 2, 3 —  $I_{п}$ ,  $I_3$ ,  $I_к$ , соответственно (при  $h_3 = 10$  мм); 4, 5, 6 —  $I_{п}$ ,  $I_3$ ,  $I_к$ , соответственно (при  $h_3 = 20$  мм); 7, 8, 9 —  $I_{п}$ ,  $I_3$ ,  $I_к$ , соответственно (при  $h_3 = 40$  мм)

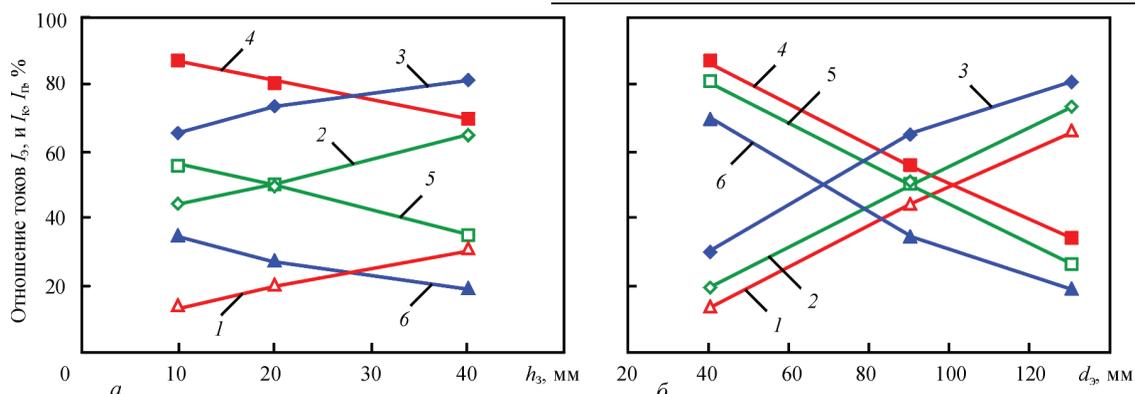


Рис. 4. Изменения процентного отношения токов электрода  $I_3$  и кристаллизатора  $I_k$  к току поддона  $I_{\text{п}}$  в зависимости от: *a* — величины заглубления электрода  $h_3$ ; 1, 4 —  $I_3/I_{\text{п}}$ ,  $I_k/I_{\text{п}}$  (при  $d_3 = 40$  мм); 2, 5 —  $I_3/I_{\text{п}}$  и  $I_k/I_{\text{п}}$  (при  $d_3 = 90$  мм); 3, 6 —  $I_3/I_{\text{п}}$  и  $I_k/I_{\text{п}}$  (при  $d_3 = 130$  мм); *б* — диаметра электрода  $d_3$  при глубине шлаковой ванны  $h_{\text{ш}} = 100$  мм; 1, 4 —  $I_3/I_{\text{п}}$  и  $I_k/I_{\text{п}}$  (при  $h_3 = 10$  мм); 2, 5 —  $I_3/I_{\text{п}}$  и  $I_k/I_{\text{п}}$  (при  $h_3 = 20$  мм); 3, 6 —  $I_3/I_{\text{п}}$  и  $I_k/I_{\text{п}}$  (при  $h_3 = 40$  мм)

сказывается «экранирование» графитовой футеровки электродом, который имеет такой же потенциал, что и графитовая футеровка, и который при заглублении в шлаковую ванну и приближении к изделию берет на себя больший процент общего тока источника. Ток поддона  $I_{\text{п}}$  при заглублении электрода увеличивается. Следует учесть, что  $I_k$  и  $I_3$  при  $d_3 = 90$  мм близки по значениям, а при заглублении на 20 мм даже равны. При  $d_3 = 40$  мм ток кристаллизатора  $I_k$  превышает ток электрода  $I_3$ , а при  $d_3 = 130$  мм наблюдаем обратную ситуацию — ток электрода превышает ток кристаллизатора. Из графика рис. 3, *б* отчетливо видно слабое влияние величины диаметра электрода  $d_3$  на ток поддона  $I_{\text{п}}$  и сильное влияние его на  $I_3$  и  $I_k$  при малом заглублении электрода.

На графиках рис. 4, *a* видно, что для  $h_3 = 10$  мм ток кристаллизатора превалирует над током электрода только при  $d_3 < 100$  мм, при  $d_3 > 100$  мм ситуация изменяется на противоположную. Для  $h_3 = 20$  мм ток кристаллизатора превалирует над током электрода при  $d_3 < 90$  мм, при  $d_3 > 90$  мм си-

туация изменяется на противоположную. Для  $h_3 = 40$  мм ток кристаллизатора превалирует над током электрода при  $d_3 < 70$  мм, при  $d_3 > 70$  мм ситуация изменяется на противоположную.

При значении глубины шлаковой ванны  $h_{\text{ш}} = 100$  мм по графикам на рис. 4, *б* видно, что при  $d_3 = 40$  мм на всем диапазоне изменений  $h_3$  ток кристаллизатора имеет большее влияние на процесс по сравнению с током электрода. При  $d_3 = 90$  мм при  $h_3 > 20$  мм ток электрода превалирует над током кристаллизатора. При  $d_3 = 130$  мм на всем диапазоне изменений  $h_3$  ток электрода имеет большее влияние на процесс по сравнению с током кристаллизатора.

Очевидно, что для ЭШН в ТПК ток электрода определяет скорость его плавления, ток кристаллизатора играет роль выравнивания электрического поля вблизи изделия, а ток поддона определяет глубину проплавления изделия, т.е., используя такие графики, как на рис. 3, можно выбрать необходимое соотношение между величиной заглубления электрода и его диаметром.

Как видим из графиков рис. 5 изменение величины отношения токов электрода  $I_3$  к току кристаллизатора  $I_k$  от заглубления электрода  $h_3$  имеет ярко выраженный характер и соответствует практически линейной зависимости. Т.е. по величине  $I_3/I_k$  можно косвенным путем вычислить такой параметр, как величина заглубления  $h_3$  и использовать его для регулирования процесса ЭШН. Тем более, что отношение токов  $I_3/I_k$  должно гораздо слабее зависеть от изменения проводимости шлака в связи с изменением температуры, чем непосредственно сами токи электрода и кристаллизатора.

**Расчет параметров электростатического поля вблизи дна шлаковой ванны (тип «П»).** Распределение напряженности электрического поля по поверхности изделия характеризует распределение плотности тока и, тем самым, относительное распределение теплового поля на по-

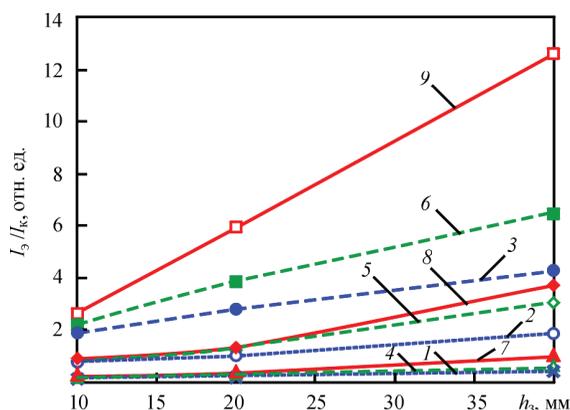


Рис. 5. Изменения отношения токов электрода  $I_3$  к току кристаллизатора  $I_k$  в зависимости от заглубления электрода  $h_3$  при различных диаметрах электрода  $d_3$  для разных глубин шлаковой ванны  $h_{\text{ш}}$ : 1, 2, 3 —  $I_3/I_k$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{\text{ш}} = 100$  мм); 4, 5, 6 —  $I_3/I_k$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{\text{ш}} = 70$  мм); 7, 8, 9 —  $I_3/I_k$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{\text{ш}} = 50$  мм)

верхности металлической ванны. Т. е. по форме эквипотенциальных линий модели вблизи изделия можно спрогнозировать относительную неравномерность проплавления  $\delta_{пр}$ , а также относительную среднюю для поверхности изделия глубину проплавления  $h_{пр}$ .

На рис. 6 представлен пример расчета формы эквипотенциальных линий электростатических полей вблизи дна шлаковой ванны при подключении ТПК к источнику по схеме типа «П» и типа «Э». Как видим на рис. 6, а, вблизи дна шлаковой ванны (или на поверхности изделия) для схемы подключения типа «П» напряженность электрического поля у пристеночной области кристаллизатора выше, чем в центре изделия. Противоположное соотношение напряженностей мы видим при использовании схемы подключения типа «Э».

Относительная неравномерность проплавления  $\delta_{пр}$  вычислялась по формуле:

$$\delta_{пр} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{прi} - \overline{h_{пр}})^2}}{\overline{h_{пр}}},$$

где количество точек замеров вдоль диаметра кристаллизатора  $n = 19$ ;  $h_{прi}$  — относительная глубина проплавления в  $i$ -ой точке замера, обратно пропорциональная расстоянию между соседними эквипотенциальными линиями по  $i$ -ой координате.

Из графиков на рис. 7 видно, что зависимости  $\delta_{пр}$  от  $h_3$  для различных диаметров электродов и глубин шлаковой ванны имеют экстремальный характер в исследуемом диапазоне изменений  $h_3$ . Минимальное значение относительной глубины проплавления наблюдается для  $d_3 = 130$  и  $h_{ш} = 70$  мм при величине заглупления электрода в шлаковую ванну  $h_3 = 30$  мм.

Графики изменения относительной средней глубины проплавления  $\overline{h_{пр}}$  в зависимости от заглупления электрода  $h_3$  при различных диаметрах электрода  $d_3$  для разных глубин шлаковой ванны  $h_{ш}$  представлены на рис. 8. Здесь мы наблюдаем, что при увеличении заглупления электрода в шлаковую ванну, т. е. при приближении его к изделию, средняя глубина проплавления изделия растет. Увеличение диаметра электрода, так же как и уменьшение глубины шлаковой ванны, приводит к увеличению средней глубины проплавления.

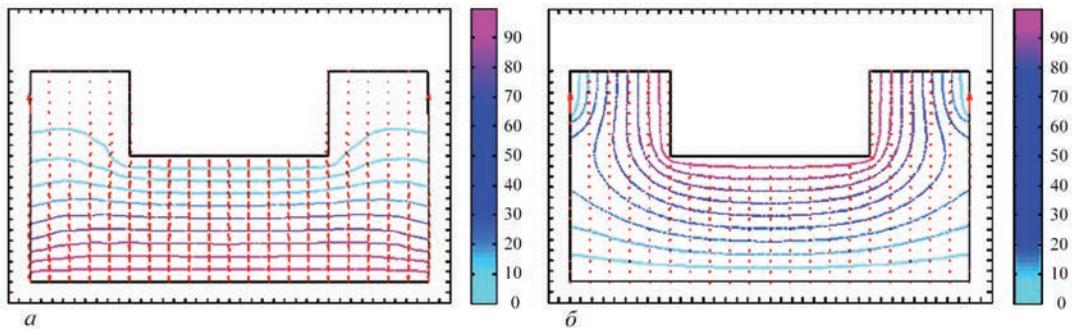


Рис. 6. Расчет формы эквипотенциальной линии электростатических полей вблизи дна шлаковой ванны при заглуплении электрода  $h_3 = 40$  мм и диаметре электрода  $d_3 = 90$  мм для глубины шлаковой ванны  $h_{ш} = 100$  мм; а — схема подключения типа «П»; б — схема подключения типа «Э»

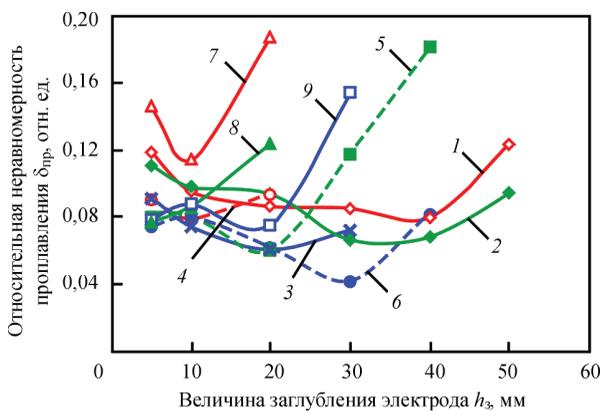


Рис. 7. Изменения относительной неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  в зависимости от заглупления электрода  $h_3$  при различных диаметрах электрода  $d_3$  для разных глубин шлаковой ванны  $h_{ш}$ : 1, 2, 3 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{ш} = 100$  мм); 4, 5, 6 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{ш} = 70$  мм); 7, 8, 9 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{ш} = 50$  мм)

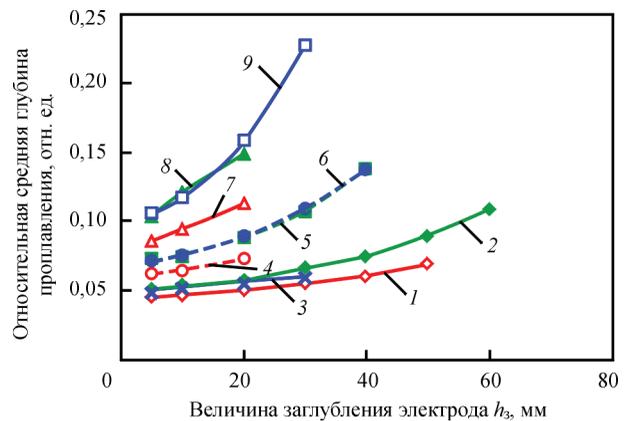


Рис. 8. Изменения относительной средней глубины проплавления  $\overline{h_{пр}}$  в зависимости от заглупления электрода  $h_3$  при различных диаметрах электрода  $d_3$  для разных глубин шлаковой ванны  $h_{ш}$ : 1, 2, 3 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{ш} = 100$  мм); 4, 5, 6 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{ш} = 70$  мм); 7, 8, 9 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_3 = 40, 90, 130$  мм, соответственно, при  $h_{ш} = 50$  мм)

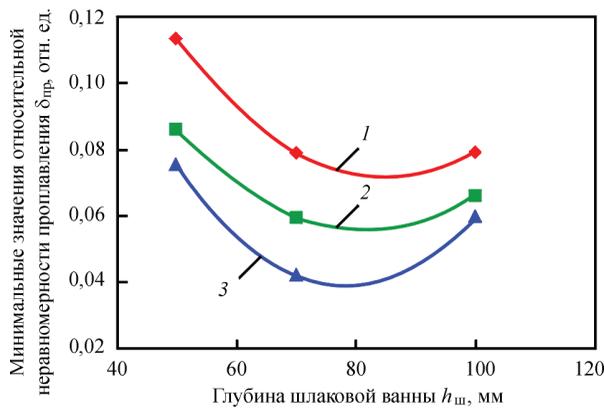


Рис. 9. Изменения минимальных значений относительной неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  в зависимости от глубины шлаковой ванны  $h_{ш}$  при различных диаметрах электрода  $d_э$ : 1, 2, 3 —  $\delta_{пр}$  (для  $d_э = 40, 90, 130$  мм, соответственно)

На рис. 9 представлены графики изменения минимальных значений относительной неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  в зависимости от глубины шлаковой ванны  $h_{ш}$  для разных диаметров электродов  $d_э$ . Из графиков следует, что оптимальная глубина шлаковой ванны лежит в диапазоне 70...80 мм, а наилучший показатель  $\delta_{пр} = 0,04$  будет у процесса с электродом  $d_э = 130$  мм.

Аналогичные вычислительные эксперименты проведены для ЭШН в ТПК по схеме подключения к источнику питания с «потенциальным» электродом (тип «Э») и с «потенциальным» кристаллизатором (тип «К»). Объем статьи не позволяет привести все полученные данные по этим экспериментам, поэтому приведем только обобщенные результаты:

1. При схеме подключения ТПК к источнику питания типа «Э» через электрод протекает наибольший ток, который равен сумме токов, протекающих через поддон и кристаллизатор. Таким образом, обеспечивается более эффективное по сравнению с подключением по схеме типа «П» плавление электрода и достаточный прогрев изделия. ЭШН с ТПК, подключенным по схеме «Э», будет иметь наибольшую производительность по сравнению с подключениями по схемам типа «П» и «К». Зависимость отношения тока поддона  $I_{п}$  к току кристаллизатора  $I_{к}$  от заглабления электрода  $h_э$  имеет существенно нелинейный характер, приближающийся к экспоненциальному. Тем не менее, это обстоятельство не может повлиять на использование функций  $h_э = F[I_{п}/I_{к}]$  для косвенного измерения величины заглабления и автоматического поддержания заданного значения этого параметра. Также как и при схеме подключения типа «П», при увеличении заглабления электрода в шлаковую ванну, т. е. при приближении его к изделию, средняя глубина проплавления изделия растет. Увеличение диаметра электрода, так же как и уменьшение глубины шлаковой ванны, при-

**Расходуемая мощность при ЭШН для разных схем подключения**

Расходуемая мощность, кВт	Тип схемы подключения		
	«П»	«Э»	«К»
$P_э$	99,950	99,950	99,950
$\Sigma P$	162,456	99,950	162,540
$\Sigma P/P_э$	1,63	1,0	1,63

водит к увеличению средней глубины проплавления. Оптимальная глубина шлаковой ванны, при которой неравномерность проплавления  $\delta_{пр}$  минимальна, соответствует  $h_э = 100$  мм, а наилучший показатель  $\delta_{пр} = 0,06$  будет у процесса с диаметром электрода  $d_э = 130$  мм.

2. Подключение ТПК к источнику питания по схеме типа «К» является менее распространенным на практике, так как ток, протекающий через кристаллизатор, является суммой токов электрода и поддона, из-за чего снижается эффективность плавления электрода и снижается роль поддона, прогревающего изделие. Зависимость отношения тока электрода  $I_э$  к току поддона  $I_{п}$  от заглабления электрода  $h_э$  имеет ярко выраженный характер и может быть использована для косвенного измерения величины заглабления электрода в шлаковую ванну. Зависимости  $\delta_{пр}$  от  $h_э$  для схемы подключения ТПК к источнику питания типа «К» не обладают экстремальным характером, резко поднимаются при заглаблении электрода, и значения  $\delta_{пр}$  на порядок превышают значения, полученные для схем подключения «П» и «Э». При увеличении заглабления электрода в шлаковую ванну, т.е. при приближении его к изделию, средняя глубина проплавления изделия практически не изменяется. Увеличение диаметра электрода, так же как и уменьшение глубины шлаковой ванны, приводит к увеличению средней глубины проплавления. Оптимальная глубина шлаковой ванны для минимизации неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  соответствует  $h_э = 100$  мм, а наилучший показатель  $\delta_{пр} = 0,5$  будет у процесса с диаметром электрода  $d_э = 40$  мм.

3. В таблице приведены расчеты расходуемой мощности  $\Sigma P$  для ЭШН при  $d_э = 90$  мм,  $h_э = 20$  мм,  $h_{ш} = 100$  мм для трех типов схем подключения, при условии, что на электроде для всех рассматриваемых случаев расходуется одинаковая мощность  $P_э = 99,950$  кВт. Из расчетов видно, что процесс при подключении по схемам типа «П» и «К» потребляет примерно в 1,6 раза больше мощности, чем при схеме типа «Э».

**Моделирование двухконтурной схемы питания ТПК при схеме подключения с «потенциальным» поддоном (тип «П»).** Использование двух источников питания для проведения процесса ЭШН с ТПК считается менее экономичным и

более громоздким, чем питание одним источником. Однако использование двухконтурной схемы питания ТПК в некоторых случаях может привести к улучшению показателей проплавления изделия.

При моделировании двухконтурной схемы питания ТПК рассматривалась ситуация, когда изменяется напряжение электрода относительно напряжения кристаллизатора. При этом напряжение кристаллизатора остается неизменным. В этом случае исследуем изменения относительной средней неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  при гипотетическом переходе схемы питания от схемы типа «П» к схеме типа «К», а именно — изменение  $\delta_{пр}$  при увеличении роли кристаллизатора в проплавлении изделия.

На рис. 10 приведена двухконтурная схема питания ТПК. Напряжение на кристаллизаторе относительно поддона  $U1$  в расчетах остается неизменным, а напряжение на электроде относительно поддона  $U2$  постепенно уменьшается от значения равного  $U1$ , т.е.  $U1/U2 = 1$ , до значения  $U1/U2 = 4$ .

Расчетные графики изменения относительной неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  в зависимости от заглубления электрода  $h_3$  при различных соотношениях напряжений на кристаллизаторе и электроде  $U1/U2$  при диаметре электрода  $d_3 = 90$  мм и глубине шлаковой ванны  $h_{ш} = 100$  мм представлены на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что в исследуемом диапазоне величины заглубления электрода наилучшие показатели  $\delta_{пр}$  будут при равенстве  $U1$  и  $U2$ . При равенстве  $U1$  и  $U2$  двухконтурная схема является практически одноконтурной. Однако при заглублении электрода более чем на 45 мм и соотношении  $U1/U2 = 1,5$  двухконтурная схема имеет более низкие значения показателя  $\delta_{пр}$ , чем при одноконтурной схеме подключения.

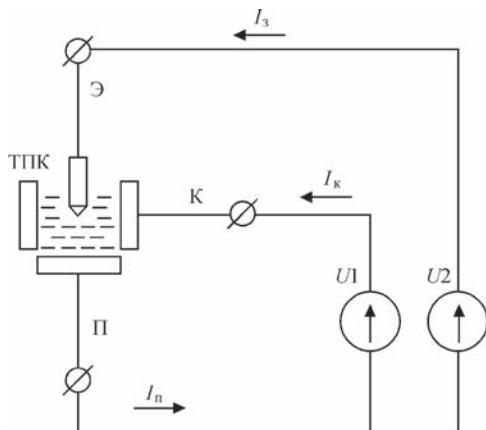


Рис. 10. Двухконтурная схема питания ТПК: Э, К и П — клеммы для подключения к электроду, токоведущей секции кристаллизатора и поддону, соответственно;  $I_3$ ,  $I_к$  и  $I_п$  — ток электрода, ток кристаллизатора и ток поддона, соответственно; источники постоянного тока с напряжениями  $U1$  и  $U2$ , соответственно

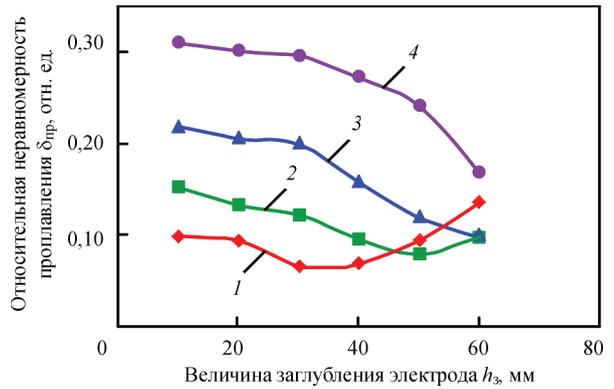


Рис. 11. Изменения относительной неравномерности проплавления  $\delta_{пр}$  в зависимости от заглубления электрода  $h_3$  при различных соотношениях напряжений на кристаллизаторе и электроде  $U1/U2$  при диаметре электрода  $d_3 = 90$  мм и глубине шлаковой ванны  $h_{ш} = 100$  мм: 1 —  $U1/U2 = 1$ ; 2 — 1,5; 3 — 2,33; 4 — 4

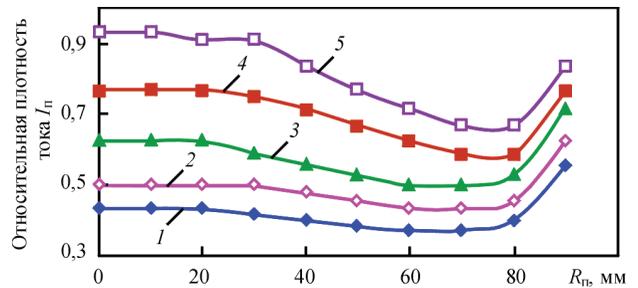


Рис. 12. Распределение относительной плотности тока  $I_п$  вдоль диаметра изделия  $R_п$  для разных величин заглубления электрода  $h_3$  диаметром  $d_3 = 90$  мм (схема подключения типа «Э»): 1 —  $h_3 = 10$  мм, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50

Расчеты параметров электростатического поля вблизи дна шлаковой ванны позволили получить представление о его форме. Для примера на рис. 12 представлено расчетное распределение относительной плотности тока  $I_п$  вдоль диаметра изделия  $R_п$  для разных величин заглубления электрода  $h_3$  диаметром  $d_3 = 90$  мм (схема подключения типа «Э»). Распределение плотности тока поддона определяет форму дна металлической ванны.

**Обобщение результатов вычислительного эксперимента.**

1. С помощью вычислительного эксперимента установлено, что основные показатели наплавки электродом большого сечения (глубина и равномерность проплавления) определяются как технологическими параметрами (диаметр электрода и его заглубление в шлаковую ванну различной глубины, количество источников питания и схема подключения к ним ТПК), так и соответствующими этим параметрам контролируемым электрическими показателями процесса.

2. Подтверждено, что значения  $I_3/I_к$  для схемы типа «П»,  $I_п/I_к$  для схемы типа «Э» и  $I_3/I_к$  для схемы типа «К», которые могут быть получены расчетным путем в процессе наплавки, соответствуют такому важному параметру, как величина

заглубления электрода. Автоматическое поддержание заданного значения величины заглубления электрода обеспечит необходимую равномерность и глубину проплавления изделия.

3. Проведен сравнительный анализ трех типов схем подключения ТПК к источнику питания, который выявил, что схема питания типа «П» обеспечивает наименьшую неравномерность проплавления при минимальной глубине проплавления изделия, а схема типа «Э» обеспечивает хорошее плавление электрода, т. е. повышенную производительность процесса при приемлемой неравномерности и глубине проплавления изделия. Это дает основание при ЭШН с ТПК на начальной стадии процесса использовать схему типа «П», а затем схему типа «Э». Переключение схем следует проводить автоматически.

4. Анализ модели с двухконтурной схемой подключения не показал особых преимуществ по качеству проплавления с процессом, использующим одноконтурную схему питания ТПК.

#### Список литературы

1. 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**, 25–26.
2. Троянский А. А., Рябцев А. Д., Мастепан В. Ю. и др. (2004) Косвенные методы контроля технологических параметров ЭШП на базе использования гармонического состава тока и напряжения переплава. *Тезисы докладов международной научной конференции «Современные проблемы теории и практики производства качественной стали», Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, 8–10 сентября 2004 г.*, сс. 80–82.
3. Троянский А. А., Рябцев А. Д., Мастепан В. Ю. и др. (2005) Использование методов моделирования токораспределения как базы для разработки технологии получения высококачественных слитков методом КЭШП. *Металлургические процессы и оборудование*, **2**, 25–27.
4. Махненко В. И., Демченко В. Ф., Тарасевич Н. И., Крикент И. В. (1985) Расчетная система для исследования

токораспределения в шлаковой ванне. *Пробл. спец. электротехнологии*, **1**, 14–19.

5. Томиленко С. В., Кусков Ю. М. (2000) Регулирование и стабилизация глубины проплавления основного металла при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе. *Сварочное производство*, **9**, 32–35.
6. Томиленко С. В., Кусков Ю. М. (1999) Энергетические особенности электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **2**, 51–53.
7. Шмелев В. Е. *Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных*. Электронная версия, <http://matlab.exponenta.ru/pde/book1/index.php>.
8. Говорков В. А. (1968) *Электрические и магнитные поля*. Изд. 3-е. Москва, Энергия.

#### References

1. Troyansky, A.A., Ryabtsev, A.D., Samborsky, M.V., Mastepan, V.Yu. (2002) Application of measuring information system for investigation of ESR process. *Metall i Litye Ukrainu*, **7 8**, 25–26 [in Russian].
2. Troyansky, A.A., Ryabtsev, A.D., Mastepan, V.Yu. (2004) Indirect methods for control of ESR technological parameters based on application of harmonic composition of current and voltage of remelting. In: *Abstr. of Papers of Int. Scient. Conf. on Modern Problems of Theory and Practice of Quality Steel Production (Mariupol, 8-10 September 2004)*. Priazov. STU, pp. 80–82 [in Russian].
3. Troyansky, A.A., Ryabtsev, A.D., Mastepan, V.Yu. et al. (2005) Application of method of current distribution modeling as the base for development of technology of high-quality ingots by CESR method. *Metallurg. Protsessy i Oborudovanie*, **2**, 25–27 [in Russian].
4. Makhnenko, V.I., Demchenko, V.F., Tarasevich, N.I., Krikent, I.V. (1985) Calculation system for investigation of current distribution in slag pool. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 14–19 [in Russian].
5. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (2000) Regulation and stabilization of base metal depth penetration in electroslag surfacing in current-supplying mold. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 32–35 [in Russian].
6. Tomilenko, S.V., Kuskov, Yu.M. (1999) Power features of electroslag process in current-supplying mold. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 51–53 [in Russian].
7. Shmelev, V.E. *Partial differential equations toolbox. Toolbox for solution of differential equations in partial derivatives* [in Russian]. <http://matlab.exponenta.ru/pde/book1/index.php>
8. Govorkov, V.A. (1968) *Electric and magnetic fields*. 3rd Ed. Moscow, Energiya [in Russian].

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕШН В СТРУМОПІВДІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ НА ШВИДКІСТЬ ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА І ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ

В. Г. СОЛОВЙОВ, Ю. М. КУСКОВ

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

Проведено обчислювальний експеримент, який показав, що контрольовані електричні показники процесу ЕШН можна використовувати для регулювання форми металеві ванни і швидкості плавлення електрода. Визначено залежності між величиною заглиблення електрода в шлакову ванну, середньою глибиною проплавлення виробу і рівномірністю проплавлення основного металу щодо середньої глибини проплавлення. Запропоновано спосіб розрахунку величини заглиблення електрода в шлакову ванну по співвідношенню струмів в ТПК. Проведено порівняльний аналіз трьох типів одноконтурних схем підключення кристалізатора до джерела живлення і запропоновано оптимальну схему для необхідних критеріїв якості наплавлення. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 12.

*Ключові слова*: струмопідвідний кристалізатор, експеримент, автоматизація, металева ванна, регулювання, проплавлення, піддон, електрод, провідність, схема живлення

INFLUENCE OF PROCESS AND ELECTRICAL PARAMETERS OF ESS  
IN CURRENT-SUPPLYING MOULD ON ELECTRODE MELTING RATE  
AND PENETRATION OF BASE METAL

V. G. SOLOVJEV, Yu. M. KUSKOV

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

A computational experiment was conducted which showed that the controlled electrical parameters of the process can be used to regulate the shape of the metal pool and electrode melting rate. Dependencies between the depth of electrode immersion into the slag pool, average depth of item penetration and uniformity of item penetration relative to average penetration depth were determined. A method was proposed for computation of the depth of electrode immersion into the slag pool by the ratio of currents in CSM. Comparative analysis of the three types of single-loop circuits of the mould connection to the power source was performed, and an optimum circuit for the required criteria of surfacing quality was proposed. 8 Ref., 1 Tabl., 12 Fig.

*Keywords: current-supplying mould, experiment, automation, metal pool, regulation, penetration, bottom plate, electrode, conductivity, power circuit*

Поступила в редакцию 30.03.2018



Издается с 1948 года

ISSN 0005-111X

[www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

Сварка и родственные технологии

Подписку на журнал «Автоматическая сварка» (подписной индекс 70031) можно оформить через редакцию журнала с любого месяца и на любой срок, включая выпуски журналов прошлых лет.

Тел./факс: (38044) 200-82-77

## Издательский Дом «Патон»

Предлагаем отпечатать Вашу статью, опубликованную в журнале «Автоматическая сварка» и на английском языке в журнале «The Paton Welding Journal», отдельным оттиском определенного тиража.

Оттиск статьи может быть оформлен в соответствии с пожеланиями. Размещение рекламы в нем также возможно.

Для получения дополнительной информации просьба обращаться в редакцию журнала: 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича 11, тел./факс: (38044) 200-82-77.  
[journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua), [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com)

