

УДК 669.187.56

**И.М. Билоник, доцент, канд. техн. наук,**

**Н.А. Калинин, аспирант,**

**П.К. Штанько, доцент, канд. техн. наук,**

**А.А. Шумилов, доцент, канд. техн. наук,**

**С.Н. Попов, профессор, канд. философ. наук**

*Запорожский национальный технический университет*

*E-mail: mech@zntu.edu.ua*

## **ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО ПОДОГРЕВА РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА НА ХАРАКТЕР КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОДНОМ ТОРЦЕ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ**

*Рассматривается возможность изменения характера каплеобразования на электродном торце посредством дополнительного плазменно-дугового подогрева при электрошлаковом переплаве.*

***Ключевые слова:** электрошлаковый переплав, расходующий электрод, дополнительный подогрев, характер плавления электродного торца*

### **Введение**

Согласно классическим положениям теории электрошлакового процесса известно, что изменяя характер каплеобразования на торце расходующего электрода, можно оказывать существенное влияние на условия кристаллизации. В частности при стандартной схеме оплавления электродный торец приобретает вид конуса и отрыв капли расплавленного металла происходит с его вершины. В результате формируется характерная параболическая форма металлической ванны с максимумом температур в подэлектродной области. При таких условиях тепловложения для обеспечения требуемых условий кристаллизации и получения качественного электрошлакового металла приходится ограничивать производительность процесса.

В работах [1-4] показано, что формирование на торце электрода дополнительных периферийных источников каплепадения способствует улучшению условий кристаллизации. Поэтому разработка новых методов воздействия на характер плавления электродного торца при которых обеспечивается формирование дополнительных зон каплепадения является важной и актуальной задачей.

*Целью данной работы* является исследование возможности применения дополнительного плазменно-дугового подогрева расходующего электрода во время плавки для управления характером оплавления электродного торца.

### **1. Материалы и методика исследования**

Опытные отливки из стали 20, 45ХН2МФА и 08Х18Н10Т, выплавляли на установке А-550 дополнительно оборудованной специальным плазменно-дуговым нагревателем расходующего электрода. Конструкция нагревателя и исследование его характеристик описаны в работе [5]. Схема процесса электрошлакового переплава с дополнительным плазменно-дуговым подогревом (ЭШП+ДП) приведена на рисунке 1.

Расходующими электродами служили штанги диаметром 60 и 100 мм переплавляемые соответственно в кристаллизаторы диаметром 100 и 150 мм. При проведении плавки по серийной технологии электрические параметры режима были выбраны с учетом рекомендаций [6] исходя из условия получения максимально допустимой скорости наплавления слитка. Дополнительный подогрев электродного торца проводили на следующих параметрах: электрическая мощность дуги в нагревателе 1,5...15,0 кВА; подогрев на прямой полярности (плюс на расходующем электроде); индукция магнитного поля 2,0...2,8·10<sup>-3</sup> Тл.

В опытных плавках подогрев расходующего электрода начинали одновременно с разводкой. В стационарный период плавки электрический режим на шлаке и параметры подогрева поддерживали автоматически. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, который одновременно защищал поверхность расходующего электрода от окисления.

Для исследования характера и формы оплавления торца расходующего электрода при ЭШП с дополнительным подогревом была разработана математическая модель, описывающая распределение температуры по высоте ( $z$ ) и радиусу ( $r$ ) торца при совместном нагреве электрода шлаковой ванной и плазменно-дуговым нагревателем. Рассчитав температурное поле в электродном торце и построив изотерму  $T = T_{пл}$  в координатах  $z-r$  можно определить профиль плавящегося торца и характер образования на нем источников каплепадения, что оказывает существенное влияние на условия кристаллизации и качество металла электрошлаковой отливки. Схема нагрева расходующего электрода, положенная в основу данной методики, приведена на рисунке 2, а.

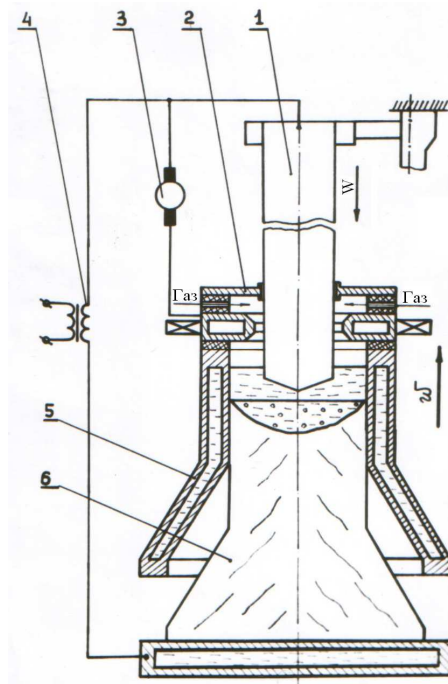


Рисунок 1 – Схема способа ЭШП с дополнительным плазменно-дуговым подогревом расходуемого электрода:  
 1 – расходуемый электрод; 2 – плазменно-дуговой нагреватель; 3, 4 – источники питания;  
 5 – кристаллизатор; 6 – отливка

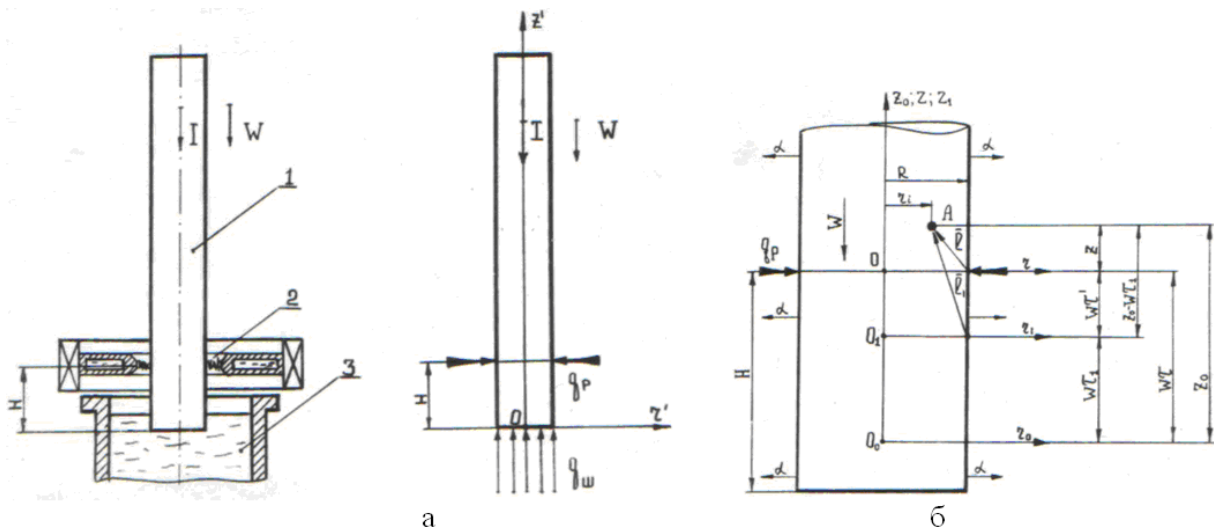


Рисунок 2 – Схема поступления тепла в расходуемый электрод при ЭШП+ДП (а) и расчетная схема для определения температурного поля в расходуемом электроде от дополнительного плазменно-дугового нагрева (б):  
 1 – расходуемый электрод; 2 – плазменная дуга; 3 – шлаковая ванна

Согласно принципу суперпозиции, температурное поле электрода  $T_3(z, r)$  можно представить как сумму температурных полей, установившихся, соответственно, от плазменно-дугового нагревателя  $T_1(z, r)$  и от шлаковой ванны  $T_2(z, r)$ .

$$T_3(z, r) = T_1(z, r) + T_2(z, r). \tag{1}$$

Рассмотрим отдельно методики определения составляющих  $T_1(z, r)$ ,  $T_2(z, r)$ .

Для вывода уравнения, описывающего распределение температуры в расходуемом электроде от плазменно-дугового нагревателя  $T_1(z, r)$  была принята расчетная схема, приведенная на рисунке 2, б, и следующие условия:

1. Расходуемый электрод, радиус которого  $R$ , движется относительно неподвижного источника тепла ( $q_p$ ) с линейной скоростью  $W$ .
2. Между поверхностью расходуемого электрода и окружающей средой происходит конвективный теплообмен, характеризующийся коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

3. На расстоянии  $H$  от торца расходуемого электрода, погруженного в шлаковую ванну, действует тепловой поток  $qP$  равномерно распределенный по периметру сечения электрода.

Согласно [7] распределение температуры в данном случае может быть представлено в виде:

$$t(z, r, \tau) = \frac{Q}{c \cdot \rho \cdot 4\pi a \cdot \tau} \exp \frac{l^2}{4a\tau}, \quad (2)$$

где  $t(z, r, \tau)$  – функция распределения температуры;  $Q$  – количество тепла, введенное в тело от источника нагрева за время  $\tau$ ;  $c$  – удельная теплоемкость тела;  $\rho$  – плотность тела;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau$  – время;  $l$  – расстояние от источника тепла до точки, в которой рассчитывается температура.

Пусть в момент времени  $\tau=0$  источник нагрева находится в начале системы координат  $z_0 0_0 r_0$ , связанной с электродом. Электрод начинают вертикально перемещать со скоростью  $W$  (см. рисунок 2, б). Через время  $\tau$  точка  $0_0$  переместится относительно источника нагрева на расстояние  $W\tau$ . Воспользуемся системой координат  $z_1 0_1 r_1$ , расположенной таким образом, что ось  $z_1 0_1$  совпадает с осью  $z_0 0_0$ , а ось  $0_1 r_1$  будет совмещена с источником нагрева и параллельна оси  $0_0 r_0$ . Выделим в объеме электрода некоторую точку  $A$  с координатами  $z_0 r_0$  и  $z_1 r_1$  в принятых системах координат. Рассмотрим изменение её температуры, вызванное действием источника тепла за время перемещения электрода на расстояние  $W\tau$ . Для этого, согласно общепринятым методикам решения тепловых задач методом источников определим элементарное приращение температуры  $dT$  за время действия источника  $dt'$  и интегрируя по времени прохождения электродом пути  $W\tau$  уравнение (2), получим в явной форме искомое изменение температуры в точке  $A$ . Для принятой расчетной схемы определим параметры, входящие в уравнение (2).

В подвижной системе координат имеем:

$$l_1^2 = (z_0 - W\tau_1)^2 + (R - r)^2, \quad (3)$$

$$W\tau_1 = W\tau - W\tau' = W(\tau - \tau'). \quad (4)$$

Элементарное количество тепла  $dQ$ , полученное электродом от источника  $qP$  за время  $dt'$ , составит:

$$dQ = qP d\tau'. \quad (5)$$

Для учета теплоотдачи с поверхности электрода введем коэффициент “ $b$ ” [8]

$$b = \frac{\alpha \cdot P}{c \cdot \rho \cdot F}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи;  $P$  – периметр расходуемого электрода;  $c$  – теплоемкость электрода;  $\rho$  – плотность электрода;  $F$  – площадь поперечного сечения электрода.

Тогда, с учетом (3)-(6) и последующего интегрирования выражения (3) в пределах от 0 до  $\tau$ , изменение температуры в точке  $A$  будет иметь следующий вид:

$$t(z_0, r_0, \tau) = \int_0^\tau \frac{qP d\tau'}{c\rho 4\pi a(\tau - \tau')} \exp \left[ -\frac{(z_0 - W\tau_1)^2 (R-r)^2}{4a(\tau - \tau')} - b(\tau - \tau') \right]. \quad (7)$$

Применим следующую подстановку:

$$\tau'' = \tau - \tau'; \quad d\tau'' = -d\tau'; \quad d\tau' = -d\tau''. \quad (8)$$

Переходя к неподвижной системе координат  $z, 0, r$  и с учетом (8) получим:

$$T(z, r, \tau) = \int_0^\tau \frac{qP d\tau''}{c\rho 4\pi a\tau''} \exp \left[ -\frac{(z + W\tau'')^2 (R-r)^2}{4a\tau''} - b\tau'' \right]. \quad (9)$$

Введя  $\lambda = c \cdot \rho \cdot a$  и выполнив соответствующие преобразования, уравнение (9) можно представить:

$$T(z, r, \tau) = \frac{qP}{4\pi\lambda} \exp \left[ \frac{zW}{2a} \right] \cdot \int_0^\tau \frac{d\tau''}{\tau''} \exp \left[ -\frac{l^2}{4a\tau''} - \left( \frac{W^2}{4a} + b \right) \tau'' \right]. \quad (10)$$

Для вычисления интегралов, входящих в выражение (10) воспользуемся следующей подстановкой:

$$\left( \frac{W^2}{4a} + b \right) \tau'' = V; \quad \tau'' = \frac{V}{W^2/4a + b}; \quad d\tau'' = \frac{dV}{W^2/4a + b}; \quad \frac{l^2}{4a\tau''} = \frac{u^2}{4V}; \quad u^2 = l^2 \left( \frac{W^2}{4a} + \frac{b}{a} \right). \quad (11)$$

При переходе к температуре предельного состояния и с учетом подстановки (11) уравнение (10) принимает наиболее простую форму:

$$T(z, r) = \frac{q_P}{2\pi\lambda} \exp\left[-\frac{ZW}{2a}\right] \int_0^\infty \frac{dV}{V} \exp\left[-\frac{U^2}{4V} - V\right], \quad (12)$$

где

$$\int_0^\infty \frac{dV}{V} \exp\left[-\frac{U^2}{4V} - V\right] = 2K_0(U), \quad (13)$$

$K_0(U)$  – функция Бесселя второго рода нулевого порядка от мнимого аргумента.

Окончательно имеем:

$$T_1(z, r) = \frac{q_P}{2\pi\lambda} \exp\left[-\frac{ZW}{2a}\right] K_0\left(l\sqrt{\frac{W^2}{4a} + \frac{b}{a}}\right). \quad (14)$$

Расчет температурного поля в расходуемом электроде от нагрева его шлаковой ванной  $T_2(z, r)$  выполняли по методике, разработанной в ИЭС им. Е.О. Патона, согласно которой распределение температуры по оси  $OZ$  электрода описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2T}{dZ^2} = K^2T - \left(\frac{2\pi R\alpha_{\dot{Y}}}{\lambda \cdot S} \dot{\Delta}_A + \frac{P_R + P_u}{\lambda \cdot S \cdot l_{\dot{Y}}}\right). \quad (15)$$

При этом решение уравнения (15) имеет вид:

$$T_3(z) = T_{пл} \exp^{-KZ'} + \left(\frac{P_R + P_u}{2\pi R\alpha_{\dot{Y}}l_{\dot{Y}}} + \bar{T}_B\right) (1 - \exp^{-KZ'}), \quad (16)$$

где  $T_{пл}$  – температура плавления электрода;  $\bar{T}_B$  – средняя температура воздуха, омывающего электрод;  $R$  – радиус электрода;  $l_{\dot{Y}}$  – длина электрода;  $Z$  – длина электрода нагретого выше точки Кюри;  $S$  – площадь сечения электрода;  $\alpha_{\dot{Y}}$  – эффективный коэффициент поверхностной теплоотдачи электрода;  $\lambda$  – теплопроводность электрода;  $K$  – коэффициент, зависящий от теплофизических и геометрических характеристик электрода.

Однако уравнение (16) описывает изменение температуры только по оси  $OZ$  электрода. Для определения формы плавящегося электродного торца путем построения изотермы  $T = T_{пл}$  в координатах  $z$  и  $r$ , необходимо знать распределение температуры по радиусу торца. С этой целью, при переплаве по серийной технологии (т.е. без подогрева) расходуемых электродов диаметром 60 мм из стали 45ХН2МФА были проведены замеры температуры на оси, половине радиуса и поверхности расходуемого электрода.

Установлено следующее:

1. Значения температур  $T_2(z)$ , рассчитанные по уравнению 16 достаточно точно совпадают с экспериментальными данными, полученными при измерении температуры на оси электрода, т.е. при  $r = 0$ .

2. Температура поверхности расходуемого электрода выше температуры на его оси на 200...240 К, т.е.  $\Delta T = 200...240$  К.

3. Изменение температуры по радиусу электрода носит линейный характер.

Тогда, учитывая полученные результаты, распределение температуры в расходуемом электроде  $T_2(z, r)$  по высоте ( $z$ ) и радиусу ( $r$ ) можно определить из следующего выражения:

$$T_2(z, r) = T_2(z) + \frac{r_i}{R} \Delta T, \quad (17)$$

где  $T_2(z, r)$  – распределение температуры по высоте ( $z$ ) и радиусу ( $r$ ) электродного торца;  $T_2(z)$  – распределение температуры по высоте электрода на его оси (рассчитывается по уравнению (16));  $r_i$  – текущий радиус электрода;  $R$  – радиус электрода;  $\Delta T$  – разность температур на поверхности и на оси электрода.

Для расчета распределения температуры по оси ( $z$ ) и радиусу ( $r$ ) электродного торца, при совместном нагреве расходуемого электрода плазменно-дуговым нагревателем и шлаковой ванной окончательно имеем следующее уравнение:

$$T_3(z, r) = \frac{q_P}{2\pi\lambda} \exp\left[-\frac{ZW}{2a}\right] K_0\left(l\sqrt{\frac{W^2}{4a} + \frac{b}{a}}\right) + \left\{ \left[ \dot{\Delta}_{i\dot{E}} \exp^{-KZ'} + \left(\frac{P_R + P_u}{2\pi R\alpha_{\dot{Y}}l_{\dot{Y}}} + \bar{\Delta}_A\right) (1 - \exp^{-KZ'}) \right] + \frac{r_i}{R} \Delta T \right\}. \quad (18)$$

## 2. Исследование влияния дополнительного подогрева расходуемого электрода на характер оплавления электродного торца

Влияние параметров дополнительного плазменно-дугового подогрева на характер оплавления электродного торца исследовали путем математического моделирования применительно к условиям переплава расходуемого электрода диаметром 60 мм из стали 45ХН2МФА под флюсом АНФ-6 в кристаллизатор диаметром 100 мм. Как следует из уравнения 14 основными параметрами дополнительного подогрева, влияющими на температурное поле торца электрода, являются мощность подогрева ( $N_{под}$ ) и расстояние от поверхности шлаковой ванны до плазмотрона ( $H$ ).

Учитывая, что опытные плавки проводили с вытягиванием слитка из кристаллизатора, расстояние от поверхности шлаковой ванны до нагревателя было постоянным и для данных условий составляло 60 мм. Интервал варьирования величиной мощности дополнительного подогрева приняли от 0 до 15 кВА, исходя из ориентировочного расчета увеличения скорости наплавления слитка в два раза по сравнению с серийной технологией.

По результатам расчета построены изотермы  $T = T_{пл}$  в координатах  $z-r$  (рисунок 3 а, б), которые представляют собой образующие электродного торца, соответственно при ЭШП по серийной технологии и ЭШП с дополнительным плазменно-дуговым подогревом расходуемого электрода. Согласно рисунку 5, а следует, что при ЭШП по серийной технологии образующая торца – прямая линия с углом наклона относительно оси OZ равным 0,51 радиан. В данном случае торец расходуемого электрода будет иметь форму конуса с вершиной на оси, являющейся единственным источником каплепадения [3].

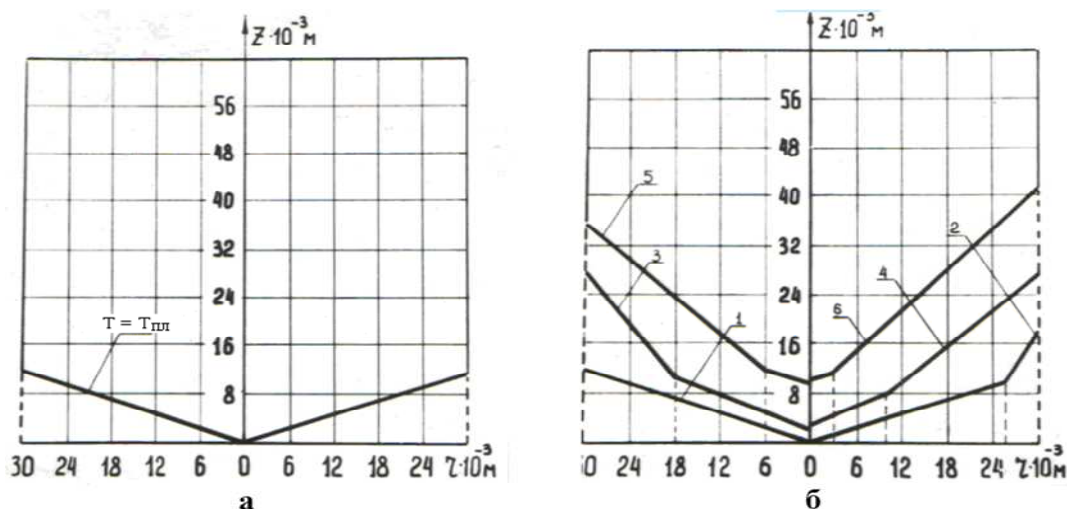


Рисунок 3 – Профиль электродных торцев, полученные при ЭШП (а) и ЭШП+ДП (б):  
1 –  $N_{под} = 1,5$  кВА; 2 –  $N_{под} = 4,5$  кВА; 3 –  $N_{под} = 7,5$  кВА; 4 –  $N_{под} = 10,5$  кВА; 5 –  $N_{под} = 13,5$  кВА; 6 –  $N_{под} = 15,0$  кВА



Рисунок 4 – Электродные торцы, полученные при ЭШП (а) и ЭШП+ДП (б)

При ЭШП с дополнительным плазменно-дуговым подогревом расходуемого электрода вид образующей  $T = T_{пл}$  определяется величиной мощности подогрева. В частности, если мощность подогрева не превышала 1,5...3,0 кВА, то образующая также представляла собой прямую линию, а форма электродного торца и характер его оплавления были практически такими же, как и при ЭШП по серийной технологии. Однако, уже при мощности подогрева 4,6 кВА на образующей возникает перегиб, который разделяет её на два прямолинейных отрезка с различными углами наклона относительно оси OZ (см. рисунок 3, б). Появление точки перегиба на образующей приводит к формированию дополнительного источника каплепадения. Причем, на электродном торце источники каплепадения располагаются в виде концентрической окружности, что было подтверждено экспериментально (рисунок 4, б). Появление зоны дополнительного каплепадения на электродном торце обеспечивает равномерное распределение падающих капель по сечению слитка и способствует улучшению условий кристаллизации электрошлаковой отливки, что подтверждено работами [1, 3].

Согласно расчетным данным, представленным на рисунке 3, б, следует, что радиус зоны дополнительного каплепадения зависит обратно пропорционально от мощности подогрева. Установлено, что если мощность подогрева составляла 4,5 кВА, то радиус зоны дополнительного каплепадения был равен 24...26 мм, а при 10,5 кВА радиус уменьшился до 7...9 мм и при 15 кВА – фактически слился с вершиной конуса. То есть, когда мощность дополнительного подогрева достигает 15 кВА весь расплавляемый металл стекает, практически, только с вершины электродного торца и эффект образования дополнительной зоны каплепадения не проявляется.

Важной особенностью характера оплавления электродного торца при ЭШП с дополнительным подогревом электрода является увеличение длины образующей, то есть длины изотермы  $T=T_{пл}$ . В данном случае, площадь поверхности электродного торца, которая контактирует с жидким шлаком, существенно возрастает по сравнению с серийной технологией (рисунок 3, б), что способствует более полному протеканию процессов рафинирования металла [8]. Причем, длина образующей торца (изотермы  $T=T_{пл}$ ) и, следовательно, величина площади контакта расплавляемого металла с жидким шлаком зависит прямопропорционально от мощности дополнительного подогрева.

Таким образом, для рассмотренных условий плавки, дополнительная зона каплепадения на электродном торце образуется при мощности подогрева 4,5...13,5 кВА: если расстояние от поверхности шлаковой ванны до плазмоторна составляет 60 мм.

#### **Выводы**

1. Использование при ЭШП дополнительного плазменно-дугового подогрева расходоуемого электрода позволяет эффективно изменять характер оплавления электродного торца.

2. Дополнительный подогрев обеспечивает формирование дополнительной зоны каплеобразования в виде концентрической окружности. Одновременно, возрастает боковая поверхность оплавления торца. Эти факторы способствуют равномерному распределению падающих капель по сечению поверхности металлической ванны и увеличению площади поверхности реагирования шлака с жидким металлом.

В дальнейших работах планируется определить параметры дополнительного плазменно-дугового подогрева, которые, изменяя условия кристаллизации электрошлаковой отливки, будут обеспечивать улучшение структуры и свойств литого металла при одновременном повышении скорости наплавления слитка.

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Медовар Б.И. Применение холодной модели ЭШП при моделировании процесса плавания расходоуемых электродов / Б.И. Медовар, Г.А. Бойко, С.П. Егоров // Рафинирующие переплавы. — К.: Наукова думка, 1975. — № 2. — С. 63–67.

2. Попков А.М. Влияние дополнительного подогрева электродной проволоки на температуру капель и электрические параметры процесса сварки / А.М. Попков, Ж.Е. Абилов // Сварочное производство. — 1976. — № 3. — С. 12–13.

3. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Под редакцией Б.И. Медовара. — К.: Наукова думка, 1978. — 304 с.

4. Глебов А.Г. Электрошлаковый переплав / А.Г. Глебов, Е.И. Мошкевич. — М.: Металлургия, 1978. — 216 с.

5. Исследование параметров вращающейся дуги в коаксиальном нагревателе / В.С. Попов [и др.] // Электротермическая промышленность, серия “Электротермия”. — 1984. — № 2. — С. 1–2.

6. Расчет ориентировочного режима электрошлакового переплава / В.И. Лазарев, В.А. Поздняков, Г.А. Хасин [и др.] // Металлург. — 1984. — № 3. — С. 20–22.

7. Карслоу Г.С. Теплопроводность твердых тел. Пер. с англ. / Г.С. Карслоу, Д. Егер. — М.: Наука, 1964. — 487 с.

8. Лютый И.Ю. Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов / И.Ю. Лютый, Ю.В. Латаш. — К.: Наук. думка, 1982. — 188 с.

*Поступила в редакцию 30.04.2013 г.*

#### **Білонік І.М., Калінін М.О., Штанько П.К., Шумілов А.О., Попов С.Н. Вплив додаткового плазмово-дугового підігріву витратного електрода при електрошлаковому переплавленні на характер краплеутворення на електродному торці**

Розглядається можливість зміни характеру краплеутворення на електродному торці шляхом додаткового плазмово-дугового підігріву при електрошлаковому переплавленні.

**Ключові слова:** електрошлаковий переплав, витратний електрод, додатковий підігрів, характер плавлення електродного торця.

#### **Bilonik I.M., Kalinin N.A., Shtan'ko P.K., Shumilov A.A., Popov S.N. The influence of auxiliary arc-plasmos heating by consumable electrode on nature of tip leakage on the electrode end in electroslag remelting**

The possibility of changing the dripping nature on the electrode end by an auxiliary arc-plasmos heating in electroslag remelting is researched.

**Keywords:** electroslag remelting, consumable electrode, auxiliary heating, character of electrode end fusion.