УДК 621.365.2:669.187.25

ХАРАКТЕР ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ячиков И.М., Портнова И.В.

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, e-mail: otvetsek@magtu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования на физической модели характера скорости электровихревого течения металла на поверхности и в азимутальной плоскости ванны ДППТ. Рассмотрены варианты токоподвода к ванне с помощью одного или двух подовых электродов. Показано, что при установке одного подового электрода по центру ванны на зеркале ванны наблюдается течение с минимальной средней скоростью. Установлено, что при размещении двух подовых электродов значения средних скоростей на свободной поверхности ванны увеличиваются на 37%, и возрастают еще на 6% в результате смещения катода в противоположную сторону от подовых электродов.

Ключевые слова: дуговая печь постоянного тока, подовый электрод, верхний токоподвод

CHARACTER OF THE ELECTROVORTEX FLOW OF METAL IN A BATH AT DC ARC FURNACE

Yachikov I.M., Portnova I.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: otvetsek@magtu.ru

Experimental results on a physical model of the nature of the flow rate of the electrovortex flow metal on the surface and in the azimuthal plane baths DCAF. The variants of current supply to the bath with the help of one or two of the hearth electrode. It is shown that the installation of the hearth electrode in the center of the bath on the mirror is observed flow with a minimum average speed.Found that by placing two hearth electrode, the average speed on the free surface of the bath is increased by 37% and increased by another 6% as a result of the displacement of the cathode in the opposite direction from the hearth electrode.

Keywords: DC arc furnace, hearth electrode, the upper current lead

Дуговые печи постоянного тока (ДППТ) широко применяются при реализации технологических процессов по выплавке стали, чугуна, цветных металлов и сплавов, особенно в «малой» металлургии, где используются печи емкостью до 25 т. В последнее время на ДППТ используются новые технологии перемешивания металла с использованием управляемых электровихревых течений (ЭВТ). Движение металла в токонесущем расплаве возникает в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем. При данной технологии перемешивания ванны актуальным остается исследование механизма образования и поведения ЭВТ для более детального понимания особенностей таких течений при разной конструкции печей.

Необходимо отметить, что до сих пор остается малоизученным характер ЭВТ в жидкой ванне ДППТ с двумя подовыми электродами (ПЭ). Проведение опытно-промышленных экспериментов сопряжено с рядом трудностей, поэтому основным инструментом исследования является математическое и физическое моделирование.

Целью работы является изучение на физической модели характера электровихревых течений и оценка скорости металла в ванне при токоподводах, включающих в себя сводовый (графитированный) электрод и один или два подовых электрода.

В качестве оригинала использовалась ванна пятитонной ДППТ стандартной конфигурации. При физическом моделировании были учтены положения теории подобия – это геометрическое подобие, а также выполнение равенства на модели и оригинале: числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = WL/\nu = idem$ и условия

$$\Pi = \frac{J \cdot L_0^2}{\nu}\sqrt{\mu_0/\gamma} = idem,$$

где L – характерный размер, $J_0 = I/(D^2\pi)$ – характерная плотность тока в области токоподводов (пятна дуги или подового электрода), W – характерная скорость потока; ν – кинематическая вязкость жидкости, D – диаметр токоподводов [1].

Используя эти критерии были получены: геометрические масштабы ванны $M_L = L'/L = 10$, пятна дуги и подовых электродов

$$M_D = D'/D = M_L\sqrt{M_I\frac{\nu}{\nu'}\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}}} \approx 14,$$

а также масштабы токов $M_I = I'/I = 5$ и скорости расплава $M_W = W'/W \approx 0,24$. Данные, относящиеся к оригиналу, берутся со штрихом.

Исследование проводилось на двух плавильных ваннах по методике, описанной в работах [2, 3]. Первая ванна моделировала поведение металла на свободной поверхности и имела форму усеченного конуса с углом откоса ψ=33°, высотой – *H*=40 мм, диаметром по поверхности жидкого металла – $D_в$=250 мм. Ванна имела четыре цилиндрических медных ПЭ диаметром 16 мм, вмонтированных в днище, причем первый располагался на оси ванны, а остальные – на расстоянии 40 мм от ее центра. Оси электродов проходят через угловые координаты: φ=0°, φ=90°, φ=180^0. Верхний токоподвод к жидкому расплаву осуществлялся через медный стержень (моделирующий катод) диаметром $d_к$=8 мм, который можно было перемещать по радиусу ванны. Стержень закреплялся на медном держателе и погружался в жидкий металл на глубину 1−2 мм для обеспечения электрического контакта с расплавом.

Вторая ванна моделировала поведение расплава в меридиональной плоскости ДППТ (в вертикальной плоскости, проходящей через оси ванны и подовых электродов) и имела форму полуцилиндра радиусом 125 мм, высотой 40 мм со свободной поверхностью, проходящей через оси ванны и электродов. В боковые стенки ванны вмонтированы пять медных электродов, которые своими торцевыми поверхностями контактируют с зеркалом металла. С одной стороны размещены три электрода, моделирующие аноды, один из которых установлен по оси ванны, а два других - на расстоянии 40 мм от него. С другой стороны размещены два электрода, моделирующие токоподвод к поверхности металла через дугу. Медные аноды были сменными и имели диаметры $d_{a1} = 8$ мм, $d_{a2} = 20$ мм, $d_{a3} = 30$ мм. В качестве модельной жидкости использовалось жидкое олово при температуре выше температуры плавления на 1050°С.

Для изучения характера ЭВТ и оценки скорости течения на поверхности металла проводилась видеосъемка. В ходе экспериментов характер движения металла определялся для следующих вариантов расположения катода и подовых электродов:

1) один подовый электрод, ось которого совпадает с осью ванны;

2) два подовых электрода, оси которых находятся в одной плоскости с осью ванны (угол между подовыми электродами $\Delta\varphi = 180°$);

3) два подовых электрода, угол между которыми $\Delta\varphi = 90°$.

4) два подовых электрода, угол между которыми $\Delta\varphi = 90°$; ось катода не совпадает с осью ванны (*r*= 8 см, φ=225°):

Рассмотрим характер течения расплава при первом варианте подключения электродов. Если диаметры анода и катода примерно равны ($d_a \approx d_к$), то в меридиональной плоскости в межэлектродном пространстве образуются два осесемметричных вихря (рис. 1, а). Если диаметр анода существенно больше диаметра катода ($d_a >> d_к$), то наблюдается один вихрь (рис. 1, б). На свободной поверхности отмечалось слабое движение расплава от стенок ванны к ее центру, где осуществляется его втягивание под катод (рис. 1, в). В целом в характере движения расплава имеет место осевая симметрия.

При других вариантах расположения анода(ов) и катода движение расплава имеет более сложный характер, прежде всего за счет существенных азимутальных течений.

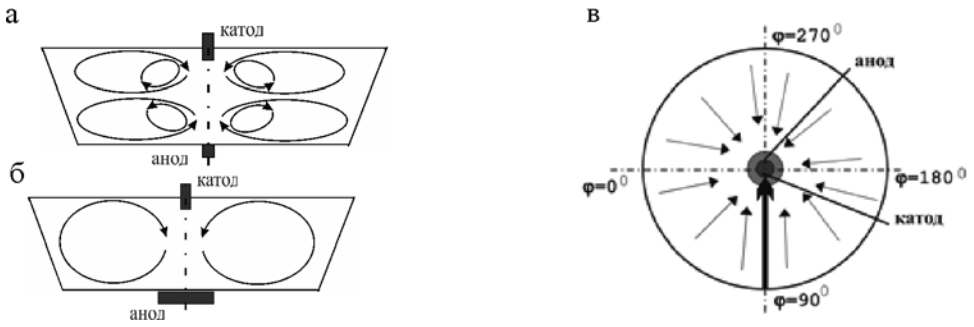

Рис. 1. Характер течения металла в ванне ДППТ с одним подовым электродом, ось которого совпадает с осью ванны:
а - схема течения в меридиональной плоскости ванны при $d_a \approx d_к$;
б – схема течения в меридиональной плоскости ванны при $d_a >> d_к$; в – схема течения на свободной поверхности расплава при любом диаметре анода;
→ – линия замера средней скорости расплава

Во втором варианте подключения электродов в меридиональной плоскости, проходящей через оси анодов, наблюдаются по два вихря с каждой стороны относительно оси ванны (рис. 2, а). Причем вихри, расположенные между катодом и анодом и между анодом и боковой стенкой, вращаются в противоположные стороны. Расплав выталкивается вдоль осей ПЭ на свободную поверхность, где один из потоков медленно течет к боковым стенкам и далее – в сторону подины, а другой – к центру ванны, где затягивается под катод. На свободной поверхности ванны наблюдается зеркально симметричная структура потоков относительно вертикальных плоскостей $\varphi=90^0(270^0)$ и $\varphi=0^0(180^0)$ (рис. 2, б). Слабое перемешивание имеет место в застойных областях, вблизи боковых стенок, удаленных от ПЭ.

В третьем варианте подключения электродов в меридиональной плоскости, проходящей через ось ванны и ось электрода, со стороны ПЭ наблюдается два разнонаправленных вихревых потока, а с противоположной стороны – один (рис. 3, а).

На свободной поверхности наиболее интенсивное течение отмечается в двугранном угле, образованном плоскостями, проходящими через оси ванны и ПЭ. При этом направление вектора скорости течения расплава зависит от азимутальной координаты φ. В характере течения имеет место зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось ванны перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ φ=45° (φ=225°) (рис. 3, б). Выявлено, что застойные зоны наблюдаются вблизи угловой координаты (φ=225°).

В четвертом варианте подключения электродов в меридиональной плоскости, проходящей через ось анода и ось ванны, наблюдается образование трех разнонаправленных замкнутых контуров потоков разной величины (рис. 4, а). На свободной поверхности ванны установлена зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось ванны перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ φ=45° (φ=225°) (рис. 4, б). Следует отметить, что при увеличении смещении оси катода от осей ПЭ размеры застойных зон уменьшаются.

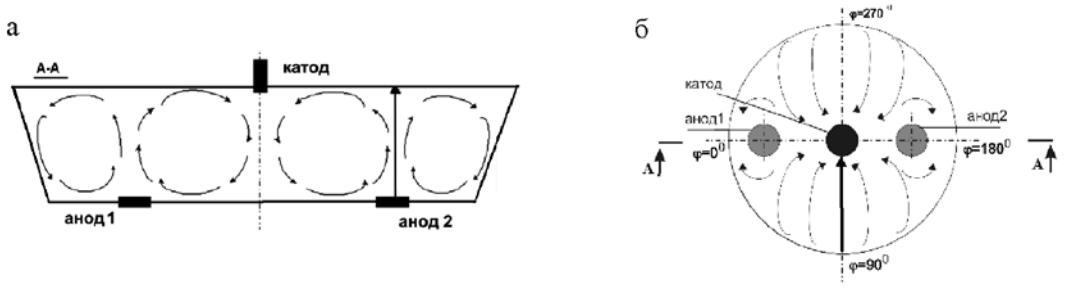

Рис. 2. Движение металла в ванне ДППТ с двумя ПЭ, установленными в одной плоскости с осью ванны:
а – схема течения в меридиональной плоскости, проходящей через оси ПЭ; б – схема течения на свободной поверхности; → – линия замера средней скорости расплава

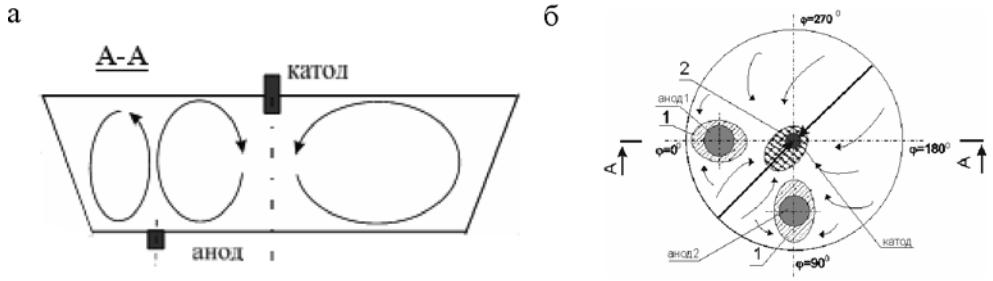

Рис. 3. Характер течения расплава на свободной поверхности:
а – схема течения в меридиональной плоскости ванны, проходящей через оси катода и ПЭ,
б – схема течения на свободной поверхности: 1 – область всплытия расплава на поверхность;
2 – область затягивания расплава вглубь ванны; → – линия замера средней скорости расплава

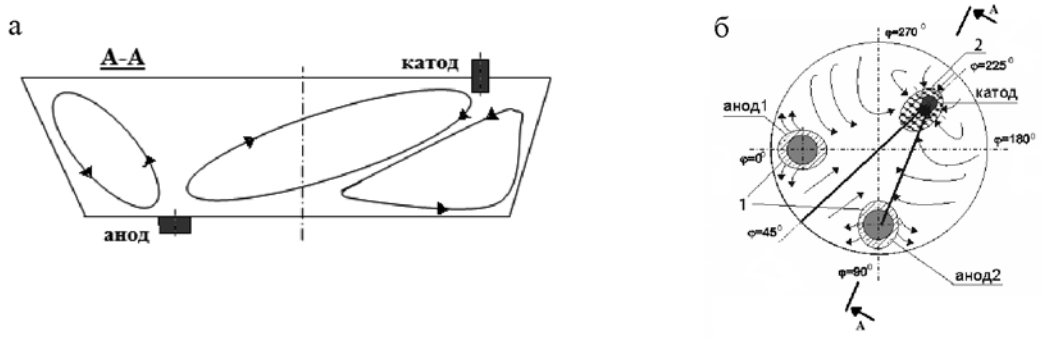

Рис. 4. Характер течения расплава при смещении катода от оси ванны: а – схема течения в меридиональной плоскости, проходящей через оси катода и анода; б – схема течения на свободной поверхности: 1 – область всплытия расплава на поверхность; 2 – область затягивания расплава вглубь ванны; → – линия замера средней скорости расплава

Анализ покадрового просмотра видео ванны №1 показал, что под медным стержнем (катодом) расплав затягивается вглубь ванны, а над ПЭ наблюдаются «бурунчики» (всплытие расплава на поверхность). При этом его минимальная скорость зафиксирована у боковых стен ванны, а максимальная − в областях над ПЭ и под катодом. Выяснено, что средняя скорость течения расплава на зеркале металла зависит от расположения катода и подовых электродов.

При количественных измерениях посредством видеосъемки определяли время прохождения частицы металла по поверхности расплава t, далее находили среднюю скорость расплава как $V = S / t$, где S – пройденное частицей расстояние. Линии замера скорости показаны стрелками на рис. 4. Погрешность измерений оценивалась, исходя из того, что длительность одного видеокадра составляла 0,03 с. Экспериментальные и расчетные данные сведены в таблицу. Из таблицы видно, что минимальные значения средней скорости наблюдаются для расположения катода и ПЭ варианта №1. Максимальные величины скорости (50,0 см/с) отмечаются для варианта № 4 с наружной стороны двугранного угла, образованного осями катода и ПЭ (см. рис. 4, б). На биссектрисе внутри двугранного скорость падает на ~20 %. Характер течения металла и средние скорости для варианта № 3 близки с вариантом № 4. Довольно большие средние скорости наблюдаются в меридиональной плоскости, над ПЭ они составляют 133 см/с (рис. 2, а).

Исходя из масштаба скорости для промышленной пятитонной ДППТ можно получить характерные значения скорости движения стального расплава по ее поверхности. Так при прохождении тока через каждый ПЭ по 3 кА средние скорости движения расплава при разных токоподводах к ванне составляют 512 см/с.

Номер варианта и рисунок	Число ПЭ, шт.	Угол между электродами, град	Ось медного стержня совпадает с осью ванны	Экспериментальные и расчет. данные			
				Эксперимент		Расчет	
				Перемещение частицы металла на расстояние, см	Время, с	Средняя скорость, см/с	Погрешность измерений, %
1, рис. 1, в	1	−	Да	12,5	0,57	21,9	8,1
2, рис. 2, а	2	180	Да	4,0	0,03	133	100
2, рис. 2, б	2	180	Да	12,5	0,30	41,7	10,0
3, рис. 3, б	2	90	Да	12,5	0,27	46,3	11,1
3, рис. 3, б	2	90	Да	12,5	0,30	41,7	10,0
4, рис. 4, б	2	90	Нет	23,0	0,57	40,4	5,26
4, рис. 4, б	2	90	Нет	15,0	0,30	50,0	10,0

Выводы. Посредством физического моделирования установлен характер ЭВТ и получены оценки средней скорость движения металла в ванне при разных токоподводах, включающих в себя сводовый (графитированный) электрод и один или два подовых электрода, на свободной поверхности и в меридиональной плоскости при прохождении через ПЭ одинаковых токов.

Установлено, что при размещении одного ПЭ по оси ванны на свободной поверхности практически отсутствует азимутальное течение и наблюдаемое радиальное течение имеет минимальную среднюю скорость среди рассматриваемых вариантов. При подключении двух ПЭ значения средних скоростей на свободной поверхности ванны увеличиваются примерно на 35%, и возрастают еще на 6% в результате смещения катода относительно центра ванны.

В жидкой ванне интенсивность ЭВТ возрастает при переходе от одного к двум подовым электродам и с увеличением расстояния между катодом и анодами. Наклонные к горизонту токи проходят большее расстояние от подового анода до пятна дуги и дают «эффект более глубокой ванны», заключающийся в увеличении длины прохождения тока по ванне. Тем самым в ЭВТ вовлекается больший объем расплава, в том числе и расположенного на периферии ванны, что положительно сказывается на перемешивании всего ее объема.

Список литературы

1. Ерохин А.А. Закономерности плазменно-дугового легирования и рафинирования металлов. – М.: Наука, 1984. – 185 с.

2. Ячиков И.М., Портнова И.В. Характер течения металла в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. № 3. – С. 67–69.

3. Ячиков И.М., Портнова И.В., Харченко О.А. Характер электровихревого течения металла в ванне ДППТ при изменении положения катода // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2009. – № 3. – С. 18–20.