

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // Процессы литья. – 2009. - №1. – С. 33-42.
2. Noblot, Alain Application of diamond high-speed casting technology at ispat unimetal / Alain Noblot, Pierre Sutter, Franz Wimmer, Klaus Frauenhuber, Lawrence Gould // MPT Int.– 2001, V. 24, № 1.- P. 66-68, 70.
3. Попов, В.Л. Анализ механизмов формирования поверхностных слоев при трении / В.Л. Попов, А.В. Колубаев // Трение и износ. - 1997.– Т. 18. - С. 818-826.
4. Физическая модель образования поверхностных трещин в слябах / А.В. Куклев, В.В. Соснин, В.В. Виноградов, В.А. Поздняков // Сталь. – 2004. - № 11.– С.95 - 98.

Поступила в редакцию 19.10.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. Н.А.Маняк

© Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Подкорытов А.Л., 2010

УДК 669.187.2

**П.И. Тищенко, С.Н. Тимошенко, С.Ю. Пасечник,
А.П. Тищенко, А.Ю. Пасечник**

ПОДОВЫЙ ЭЛЕКТРОД С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Представлен подовый электрод стержневого типа, в котором используется алюминий в качестве промежуточного жидкометаллического теплоносителя. Полость с теплоносителем выполнена переменного по высоте электрода сечения, что обеспечивает электровихревое течение теплоносителя и повышает эффективность переноса тепла от ванны жидкой стали к воде.

Ключевые слова: подовый электрод, жидкий теплоноситель, электровихревое течение

Проблема и ее связь с научной и технической задачей

Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока (ДСППТ) в силу ряда технико-экономических преимуществ [1] перед печами переменного тока получили заметное распространение как в машиностроительном комплексе для производства высококачественных сталей и сплавов, так и в «большой» металлургии [2] при производстве полупродукта. Подовый электрод (ПЭ) является одним из основных узлов ДСППТ. Из четырех типов ПЭ: проводящая подина, игольчатый, пластинчатый и стержневой, последнему чаще отдают предпочтение как наиболее рациональному с точки зрения технологии плавки и обслуживания печи [3].

Анализ исследований и публикаций

Обычно стержневой ПЭ (рис. 1) выполняется биметаллическим и включает контактирующий с металлом стальной стержень и присоединенную к нему нижнюю медную водоохлаждаемую часть.

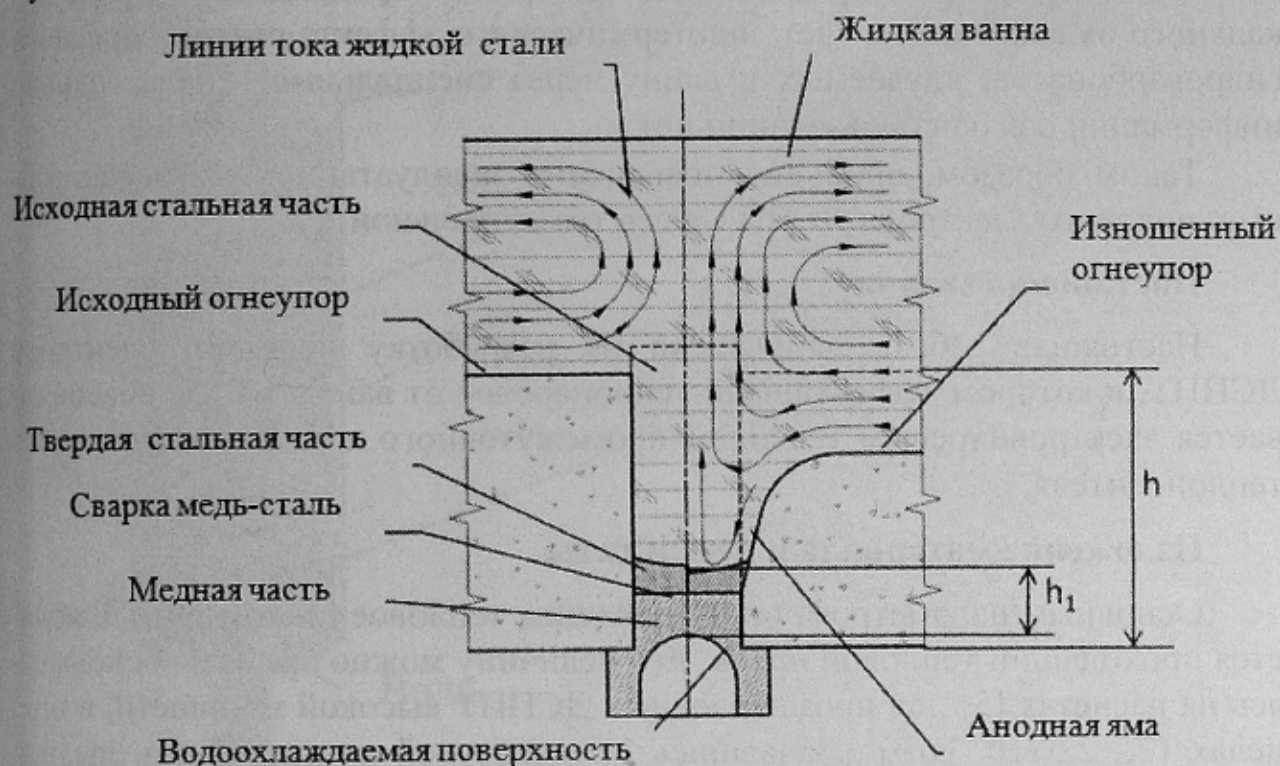


Рисунок 1 – Схема и механизм износа узла подового электрода в ДСППТ.

В футеровке печи в зависимости от ее вместимости устанавливают от одного до четырех ПЭ. Авторы [5], исследовав механизм износа ПЭ и прилегающего слоя футеровки, пришли к заключению о преобладающей роли МГД-эффекта, который заключается в создании поля скоростей в жидкой стали под действием электромагнитной силы Лоренца. В процессе интенсивного движения металла (до 0,7-1м/с в печах высокой мощности) в несколько раз в сравнении с неподвижной ванной возрастает тепловой поток от ванны к электроду и стальная часть ПЭ частично расплавляется.

Положение линии фазового перехода относительно кожуха подины (h_1) определяется проходящим через ПЭ тепловым потоком, интенсивностью охлаждения, теплофизическими и геометрическими параметрами узла электрода. В конечном счете, движение расплава приводит к формированию т.н. анодных ям (рис.1), оказывающих негативное влияние на стойкость футеровки подины ДСППТ.

В традиционной конструкции ПЭ стержневого типа фирмы Клесим [4] водоохлаждаемая часть, из соображений безопасности эксплуатации, вынесена за пределы кожуха подины, что приводит в печах высокой мощности к формированию глубоких анодных ям. Предложенное фирмой Даниэли

решение [6], в котором медная часть ПЭ приближена к жидкой ванне, наряду с эффективной системой охлаждения, уменьшает глубину анодной ямы, но требует строгого температурного контроля подового электрода в электропечи для предотвращения прожога водного канала. В [7] защита подового электрода и прилегающей футеровки производится путем локального охлаждения за счет эндотермического эффекта реакции крекинга гидрокарбонатов, вдуваемых в ванну через специальные каналы, однако информации о его использовании нет.

Таким образом, проблема повышения эксплуатационных характеристик подового электрода ДСППТ является актуальной.

Постановка задачи

Настоящая работа направлена на разработку подового электрода ДСППТ, в котором эффективный теплоперенос от ванны к воде обеспечивается электровихревым течением промежуточного жидкометаллического теплоносителя.

Изложение материала и результаты

Основным параметром, определяющим тепловое состояние ПЭ, является проходящий тепловой поток. Его величину можно принять, основываясь на расчетах [5] для промышленных ДСППТ высокой мощности, в пределах $(2...2,5) \cdot 10^6$ Вт/м². Задавшись температурой ванны (t_b) и средней температурой охлаждающей воды (t_w) соответственно 1620⁰С и 50⁰С, дадим оценку величины коэффициента теплопроводности ПЭ (λ), который обеспечит эксплуатацию подины промышленной ДСППТ толщиной $h = 1$ м (рис. 1) без формирования анодной ямы, т.е. без расплавления верхней части электрода:

$$\lambda = q \cdot h / (t_b - t_w). \quad (1)$$

Для этих условий расчетная величина λ , равная 1200...1600 Вт/(мК) существенно превышает данный показатель даже для меди – наиболее доступного из высокотеплопроводных металлов (380 Вт/(мК)). Это означает, что избежать образования анодной ямы и повышенного износа футеровки при использовании традиционного ПЭ стержневого типа невозможно.

В связи с этим актуальной проблемой является организация более эффективной, чем теплопроводность, конвективной теплопередачи в подовом электроде.

Разработан подовый электрод ДСППТ с промежуточным жидкометаллическим теплоносителем (рис. 2). Он включает стальной кожух (1) с полостью (2), заполненной теплоносителем. В полости установлен центральный стальной стержень (3) с изменяющимся по продольной оси поперечным сечением. Тепловой поток отводится охлаждающей водой посредством змеевика (4), установленного в полости с промежуточным теплоносителем.

В качестве промежуточного теплоносителя используется алюминий, который находится в жидком состоянии при эксплуатации ПЭ в ДСППТ. Выбор алюминия обусловлен следующими причинами:

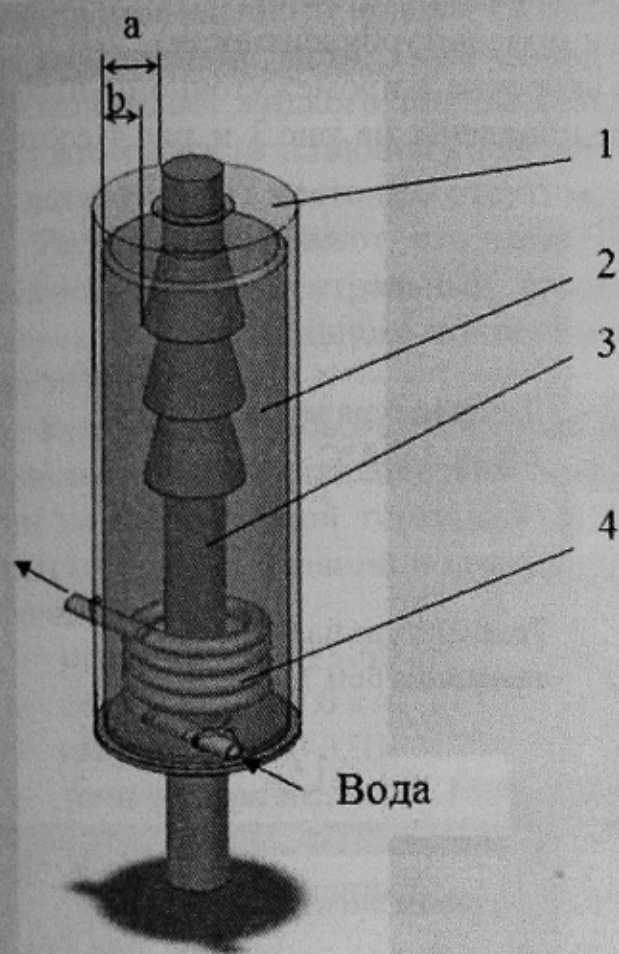


Рисунок 2 – Подовый электрод с промежуточным жидкометаллическим теплоносителем.

– высокая тепло- и электропроводность, что позволяет обеспечить преобладающее прохождение тока через теплоноситель, а не через стальную оболочку полости, что создает условия для развития конвективного теплопереноса, вызванного электровихревым течением;

– приемлемые уровни критических температур относительно температуры плавления стали, а именно температура плавления (660°C) существенно ниже, а температура кипения (2520°C) существенно выше;

– взрывобезопасность и отсутствие негативного влияния на качество стали при попадании жидкометаллического теплоносителя в ванну в аварийной ситуации.

Центральный стержень (3) с изменяющимся по продольной оси поперечным сечением обеспечивает электровихревое течение промежуточного теплоносителя при прохождении электрического тока через ПЭ вследствие эффекта Нортрупа [8]. Средняя электромагнитная сила (F , Н), возникающая в объеме жидкого электропроводного теплоносителя, может быть оценена следующим соотношением [8]:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{a}{b}\right), \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость промежуточного теплоносителя, Г/м; I – сила тока через теплоноситель, А; a, b – конструктивные параметры токопроводящего пространства (рис.2).

Численные расчеты теплообмена в ПЭ с промежуточным жидкометаллическим теплоносителем выполнены с помощью пакета прикладных программ ANSYS-CFX с наложением поля электромагнитных сил, полученного в использовании пакета ANSYS-Emag, для условий:

- температура ванны 1900K;
- сила тока 2 кА;
- температура охлаждаемой поверхности 320K;
- в расчетах реализована k-ε модель турбулентности.

Расчетные поля температуры и скорости в промежуточном жидкометаллическом теплоносителе ПЭ представлены на рис.3 и рис.4 соответственно.

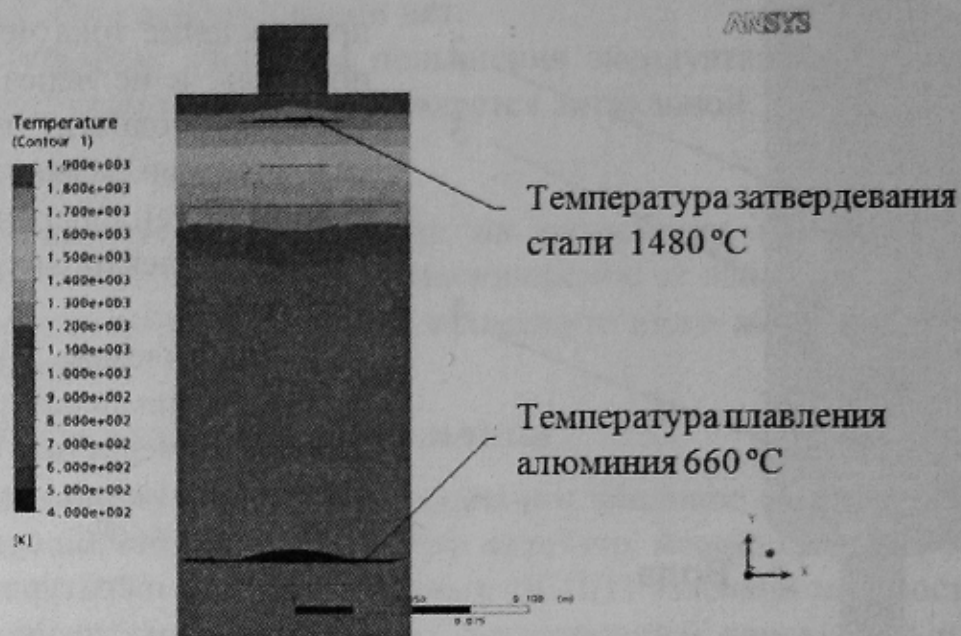


Рисунок 3 – Температурное поле в подовом электроде

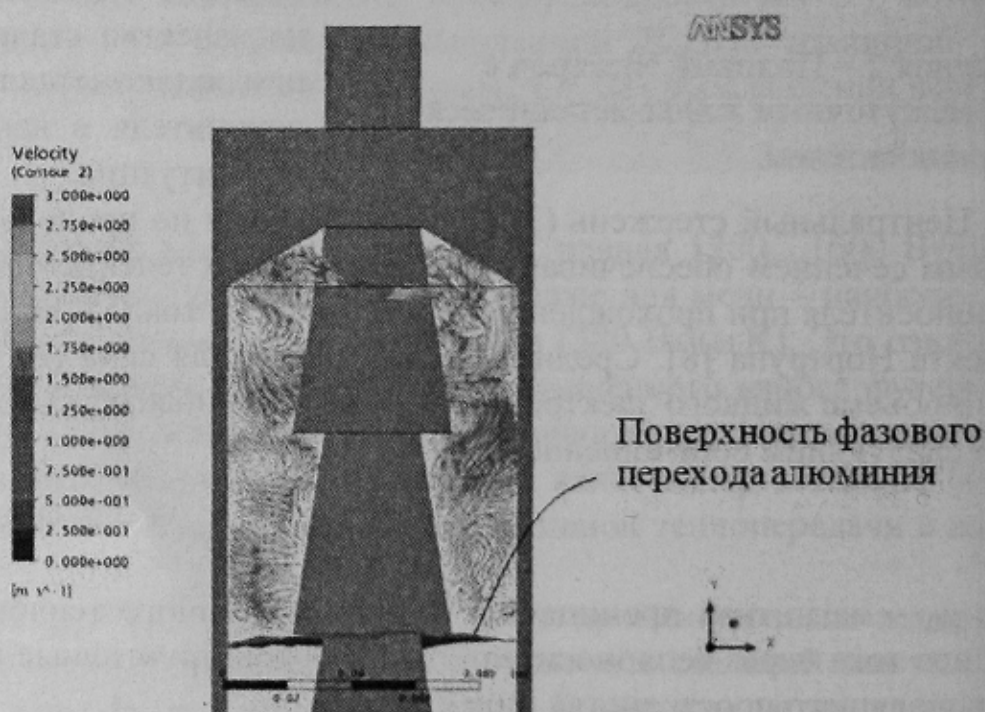


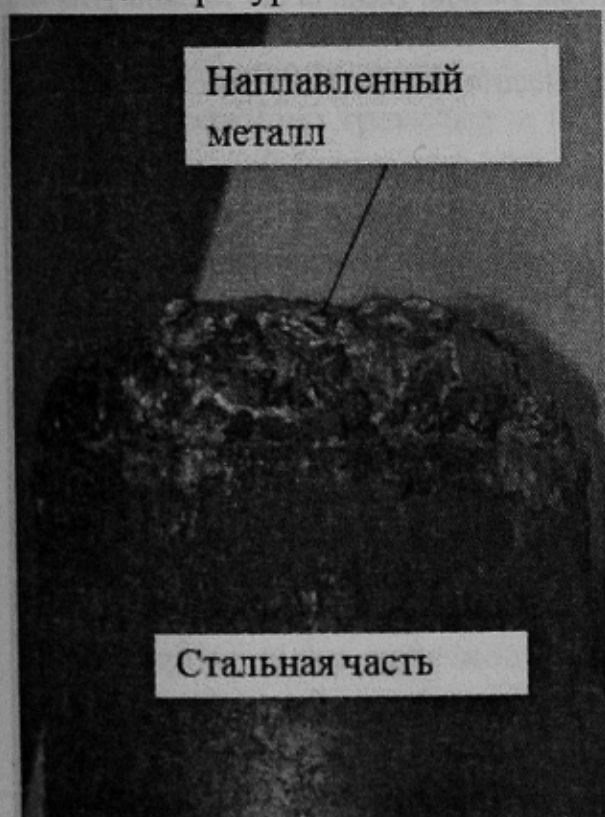
Рисунок 4 – Поле скорости в подовом электроде.

Полученные результаты показывают, что жидкий алюминий, как промежуточный теплоноситель, обеспечивает перенос тепла от металлической ванны в охлаждающей подовой электрод воде без существенного оплавления его стальной части. Поле скорости свидетельствует об интенсивном перемешивании жидкого теплоносителя в полости (до 3 м/с), что превышает возможности тепловой конвекции с характерной скоростью до 0,2 м/с [5], которая имеет место при отсутствии электровихревого течения.

Расчеты показывают, что электропроводный жидкий промежуточный теплоноситель и центральный стержень переменного сечения создают условия для эффективного конвективного теплопереноса в полости подового электрода.

Испытания подового электрода представленной конструкции с алюминиевым жидкометаллическим промежуточным теплоносителем проведены на лабораторной тигельной ДСППТ. Стальные таблетки (состав соответствует ст.3) плавил под шлаком системы CaO-CaF₂ при следующих рабочих параметрах:

- масса металла 55-60 кг,
- сила тока 1,8-2,0 кА,
- напряжение 30-35В,
- температура металла 1600-1635 °С,



- диаметр подового электрода 100 мм,
- внутренний диаметр тигля 320 мм,
- расход охлаждающей воды 0,65 м³/час,
- длительность плавки 50 мин.

Вид подового электрода, извлеченного из тигля после плавки, показан на рис. 5.

Эксперимент подтвердил рассмотренные ранее теоретические положения и результаты расчетов. Оплавления стальной части ПЭ не происходило, отмечено наплавление корочки расплава на его верхний торец. Это свидетельствует о том, что алюминиевый жидкометаллический теплоноситель обеспечивает достаточный для устойчивой работы ПЭ перенос тепла к воде.

Рисунок 5 – Подовый электрод с алюминиевым теплоносителем после эксперимента

Выводы

Таким образом, согласно расчетам и эксперименту, применение подовых электродов с промежуточным жидкометаллическим алюминиевым теплоносителем в ДСППТ позволит повысить эффективность теплопередачи от жидкой ванны к охлаждающей воде за счет электровихревого течения теплоносителя, что на практике будет способствовать минимизации образования анодных ям и повышению стойкости узла подового электрода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Сравнение характеристик дуговых печей постоянного тока нового поколения и индукционных печей / В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский, Л.В. Ярных, А.В. Афонаскин // Литейщик России. – 2002. - № 1. – С.24-27.
2. Innovation in Electric Arc Furnaces/ Y.Toulouevski, I.Zinurov. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, - 258p.
3. Pavlicevic M. DC-EAF: The Anodes Cooling System / M. Pavlicevic, B. Matijasevic, A. Della Negra, G. Gensini // Danieli news. - 1995. - №1. - P.18-29.
4. Janiak, G. Davene. Scrap-melting process and electric furnace for carrying out the process. Patent US 4821284
5. Liu X. Melting mechanism of water-cooled billet-type bottom electrode of direct current arc furnace: a numerical approach / X.Liu, J.Zhou, H.Shi et al// Metallurgical and materials transactions B. - October 2008. - №39B. - P.713-724.
6. G. Gensini, M. Pavlicevic. Cooled bottom electrode for a direct current electric furnace. Patent US 5651024.
7. H.Berger, P.Mittag, J.Steins. Bottom electrode for a metallurgical vessel. Patent US 5529598.
8. Электровихревые течения / В.В.Бояревич, Я.Ж.Фрейберг, Е.И.Шилова, Э.В.Щербинин. – Рига: Зинатне, 1985. – 315с.

Поступила в редакцию 19.10.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Д. Рябцев

© Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Пасечник С.Ю.,
Тищенко А.П., Пасечник А.Ю., 2010