

стороны, их неправильные действия могут повлечь за собой нарушения в работе всей СТС.

Тогда для оценки вероятности надежной работы подсистемы «Обслуживающий персонал» можно предложить следующий набор информативных параметров, который является квазипостоянным (он обновляется от смены к смене):

- число работающих в очистном забое, A_1 ;
- их квалификацию, A_2 ;
- возраст, A_3 ;
- отношение количества работающих в очистной выработке к их оптимальному (требуемому) количеству, A_4 ;
- прочие параметры работающих, способные оказать влияние на безопасность ведения работ, A_5 .

Кроме того, должен существовать определенный минимум биометрических параметров, регистрируемых непрерывно (в on-line режиме). К таким могут быть отнесены: температура тела человека-оператора, частота дыхания и пульса, возможно, регистрация акустического и ИК-излучения с поверхности тела горнорабочего. На сегодняшний день, эти измерения не производятся в силу сложности их реализации в производственных условиях, а также дороговизны используемой аппаратуры.

Однако, совершенно очевидно, что такая информация могла бы стать одним из ключевых звеньев на пути к решению проблемы повышения уровня промышленной безопасности при эксплуатации важных и потенциально опасных производственных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Человеко-машинные системы автоматизации / В. И. Архангельский, И. Н. Богаенко, Г. Г. Грабовский, Н. А. Рюмшин. — К. : НВК «КиА», 2000. — 296 с.
2. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело / Ушаков К. З., Каледина Н. О., Кирилин Б. Ф. и др.; под общ. ред. К. З. Ушакова — 2-е изд., стереот. — М. : Изд-во МГУ, 2002. — 487 с.
3. Мещанинов С. К. Методы моделирования и управления надежностью функционирования горных выработок : моногр. / С. К. Мещанинов. — Национальный горный университет, 2012. — 360с.
4. Проников А. С. Надежность машин / Проников А. С. — М. : Машиностроение, 1978. — 592 с.
5. Герлетка С. Влияние эргономических факторов на электрофизиологию человека // Безопасность труда в промышленности / С. Герлетка. — 2003. — №1. — С.59—63.

пост..22.01.13

О возможности управления электровихревыми течениями в металлургической печи постоянного тока с охлаждаемым подовым электродом

О. В. КАЗАК

Донецкий национальный университет

Работа посвящена изучению электровихревых течений расплавленного металла под действием сил Лоренца и конвективных потоков. Приводится постановка задачи, физическая и математическая модель протекающих процессов. Определены методы и пакеты прикладных программ для решения задачи. Получены результаты электромагнитных и гидродинамических полей в электрометаллургической печи постоянного тока с подовым электродом. Показано, что при охлаждении подового электрода до температуры плавления металла скорость движения расплава в непосредственной близости футеровки уменьшается на 20 %.

Робота присвячена вивченню електровіхревих течій розплавленого металу під дією сил Лоренца і конвективних потоків. Наводиться постановка задачі, фізична і математична модель процесів, що протікають. Визначені методи і пакети прикладних програм для вирішення задачі. Отримано результати електромагнітних і гідродинамічних полів в електрометалургійній печі постійного струму з подовим електродом. Показано, що при охолодженні подового електрода до температури плавлення металу величина швидкості руху металу біля поверхні футерування зменшується на 20 %.

Work is devoted to studying of electrovortex movement in the liquid metal under Lorenz force and convection flows. Statement of a problem, physical and mathematical model of proceeding processes is resulted. The method and software packages for modelling processes are chosen. The result of electromagnetic and hydrodynamic fields in DC arc furnace with bottom electrode is received. It is shown that cooling down the bottom electrode to the melting metal temperature leads to the decrease of molten metal velocity near fettle area by 20 %.

Введение. Наиболее актуальной проблемой в теории электровихревых течений (ЭВТ) в настоящее время являются изменение характера и скорости дви-

жения потоков расплавленного металла в металлургических печах постоянного тока с подовым электродом [1]. Такой тип печей имеет не только экономиче-

скую целесообразность, но и относится к экологически чистым технологиям выплавки стали [2].

Перспективной технологией уменьшения негативного воздействия движущегося расплава металла на защитный слой футеровки в непосредственной близости подового электрода металлургических печей является снижение температуры путем охлаждения подового электрода [3].

Модель металлургической печи. Рассмотрим процессы, протекающие в расплаве металла во время жидкого периода работы печи. Для моделирования процессов в расплаве сделаем следующие допущения:

- расплав считается немагнитным (точка Кюри составляет 760 °С);
- расплав является хорошим проводником;
- процесс считается стационарным;
- конвективным током, вызванным движением расплава, по сравнению с током проводимости можно пренебречь;
- физические характеристики расплава (проводимость, коэффициенты вязкости и теплопроводности и т.д.) предполагаются изотропными и зависят от температуры;
- химические реакции не учитываются.

В жидкий период плавки металл полностью расплавлен, а разность температур по объему металла может колебаться в зависимости от режима работы печи. Так при включенной на полную мощность дуге температура изменяется от 3500 °С в зоне горячей дуги возле катода до 1650 °С в окрестности подового электрода и вдоль поверхности футеровки. На минимальных режимах работы дуги разность температур по объему не превышает 50 °С.

По предварительным оценкам число Рейнольдса при движении расплава в печи составляет величину порядка $Re = u_0 L / \nu \approx 10^6$, что соответствует развитому турбулентному движению, которое описывалось в рамках $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

Процессы в печи при выплавке металла нестационарные. Однако они протекают достаточно медленно и с хорошей точностью могут описываться в стационарной постановке. Для стационарных процессов система уравнений магнитной гидродинамики, описывающих турбулентное движение расплава металла, имеет вид:

уравнение Навье-Стокса

$$(\bar{v}\nabla)\bar{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\bar{v} + \bar{g} + \frac{1}{\rho}[\bar{j}, \bar{B}]; \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot (\rho\bar{v}) = 0; \quad (2)$$

уравнения $k-\varepsilon$ модели турбулентности

$$\rho\bar{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \eta_T P(\bar{v}) - \left(\frac{2\rho k}{3} \right) \nabla \cdot \bar{v} - \rho\varepsilon \quad (3)$$

$$\rho\bar{v} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \left(\frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} \right); \quad (4)$$

$$\left[\eta_T P(\bar{v}) - \left(\frac{2\rho k}{3} \right) \nabla \cdot \bar{v} \right] - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k}$$

где

$$P(\bar{v}) = \frac{\nabla\bar{v}}{\nabla\bar{v} + \nabla\bar{v}^T} - \frac{2(\nabla \cdot \bar{v})^2}{3}, \quad ; \quad (5)$$

$$\eta_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$$

уравнения Максвелла

$$\nabla \times \bar{B} = \mu_0 \bar{j}, \quad \nabla \cdot \bar{B} = 0; \quad (6)$$

$$\nabla \times \bar{E} = 0, \quad \nabla \cdot \bar{E} = \rho_e; \quad (7)$$

обобщенный закон Ома для движущейся среды

$$\bar{j} = \sigma(\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}); \quad (8)$$

закон сохранения заряда

$$\nabla \cdot \bar{j} = 0; \quad (9)$$

уравнение теплопроводности

$$\rho C_p \bar{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot ((a + a_T) \nabla T) + j^2 / \sigma. \quad (10)$$

Здесь \bar{v} , ρ и p – скорость, плотность и давление жидкости; \bar{g} – ускорение свободного падения; \bar{j} – плотность тока; \bar{B} – индукция магнитного поля; η – коэффициент динамической вязкости среды; η_T – турбулентная вязкость; $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_μ – константы модели турбулентности; k , ε – параметры модели турбулентности; σ – удельная проводимость среды; \bar{E} – напряженность электрического поля, T – температура, a – коэффициента теплопроводности, a_T – турбулентный коэффициент теплопроводности, j^2/σ – мощность джоулевых источников тепла, C_p – удельная теплоемкость расплава. В уравнении (1) учтены силы: $-\nabla p$ – давления, $\nabla \cdot (\eta + \eta_T)(\nabla\bar{u} + (\nabla\bar{u})^T)$ – вязкого трения, $\rho\bar{g}$ – тяжести, $\bar{j} \times \bar{B}$ – электромагнитная сила Лоренца.

Рассматриваемая задача не имеет аналитического решения и поэтому решается численно. По результатам анализа численных методов решения был выбран метод конечных элементов и конечных объемов и их программная реализация в системах ANSYS и COMSOL.

Для моделирования процессов, протекающих в объеме расплава, за основу возьмем параметры промышленной печи [4]. Геометрические размеры печи изображены на рис. 1. Здесь 1 – футеровка, 2 – расплав металла, 3 – электроды, 4 – слой шлака. Расчетная область в силу осевой симметрии задачи составляет половину реальной области.

Расчеты проводились при следующих граничных условиях, которые ставились на границах В₁ – В₉, изображенных на рис. 1.

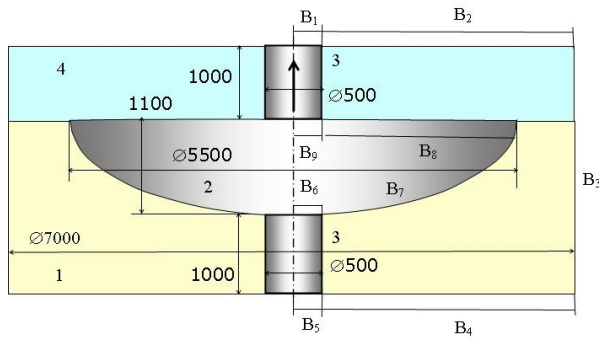


Рис. 1. Схема цилиндрической печи постоянного тока

Электромагнитные условия:

B_1, B_5, B_6, B_9 – плотность тока $j_n = j_0 = I/S$, где S – площадь поперечного сечения электрода;
 B_8, B_7 – изоляция электрического тока $j_n = 0$;
 B_6, B_7, B_8, B_9 – условия непрерывности электрического и магнитного поля $E_{\tau_1} = E_{\tau_2}$, $D_{n_1} = D_{n_2}$ и $B_{n_1} = B_{n_2}$, $B_{\tau_1} = B_{\tau_2}$.

Тепловые условия:

B_9 – постоянная температура электрической дуги $T_1 = 3300$ К;
 B_6 – постоянная температура подового электрода $T_2 = 1980$ К;
 B_8 – постоянная температура на границе со шлаком $T_3 = 1900$ К;
 B_7 – постоянная температура на границе с футеровкой $T_3 = 1900$ К.

Гидродинамические условия:

B_6, B_7, B_8, B_9 – условие прилипания на границе расчетной области $\vec{v} = 0$. На поверхности расплава находится шлак, вязкость которого много больше расплава, поэтому условие справедливо для B_8 .

Для всех типов анализа на оси симметрии расчетной области использовалось условие осевой симметрии.

При моделировании использовались стандартные физические характеристики для расплава, электродов и футеровки, которые считаются известными функциями температуры и задавались таблично [5]. В $k-\varepsilon$ модели турбулентности были выбраны следующие константы $C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{k2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

Результаты моделирования. Были смоделированы электромагнитные [6, 7] и тепловые процессы в расплаве металла в осесимметричной постановке. Максимальная температура локализована вблизи катода, где горит электрическая дуга, на расстоянии порядка радиуса электрода. В распределении температуры имеется радиальный градиент, который приводит к возникновению конвекции в электровихревых течениях.

Согласно стратегии решения задачи, были смоделированы гидродинамические процессы в расплаве металла в осесимметричной постановке с учетом конвекции и силы Лоренца. На рис. 2 приведены гидродинамические поля модуля скорости, вектора скорости и линии тока расплава.

Как видно из графиков в расплаве возникает интенсивное вихревое движение. Конвективное движение совпадает по направлению с электровихревым и усиливает его. Вихрь образуется в области подового электрода, как показано на рис. 2, и там имеет максимальную скорость. Поток расплава на оси симметрии восходящий и, достигая верхней границы объема расплава, устремляется вниз. Максимальная скорость вихревого движения наблюдается на оси электродов и достигает 0,5 м/с, что примерно в 1,5 раза больше скорости движения без конвекции [8, 9]. Скорость расплава у торца анода возле футеровки около 0,3 м/с. В области верхнего электрода виден вихрь с обратным направлением вращения создаваемый неравномерным распределением плотности в области верхнего электрода.

При наличии конвекции в движение вовлечен весь объем расплава и отсутствуют застойные зоны вблизи края ванны печи, как при движении расплава без конвективных потоков [9]. Кроме того, уменьшился вихрь в области верхнего электрода. Основной вклад в вихревое движение расплава вносит электромагнитная сила Лоренца. Наличие конвекции приводит к увеличению максимальной скорости вихревого движения расплава на 1/3 по сравнению со скоростью электровихревого движения только под действием силы Лоренца.

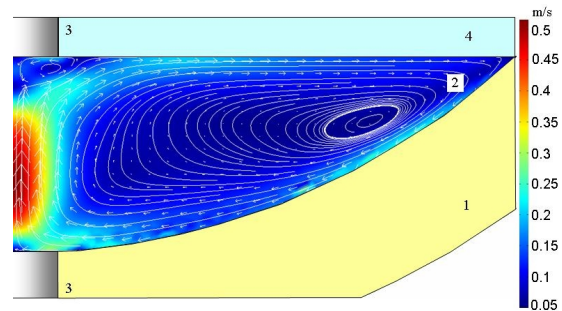


Рис. 2. Поле модуля и вектора, а также изолинии движения расплава с учетом конвекции

Для верификации полученных результатов аналогичные расчеты были проведены в пакете COMSOL. Сравнение результатов полученных разными методами и пакетами показало незначительное расхождение результатов и составило около 3% [9]. Хорошее согласование результатов, полученных разными методами и пакетами, говорит о надежности методов и достоверности полученных результатов. На следующем этапе верификации было проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по повышенному износу футеровки [8]. Хорошее согласование областей с максимальной скоростью и максимальным износом футеровки говорит о достоверности полученных результатов.

На рис. 3 приведено распределение скорости потока расплава вблизи поверхности футеровки вокруг подового электрода для разной температуры подового электрода. Как видно, понижение температуры подового электрода не существенно влияет на общий характер и скорость движения расплава, однако заметно влияет на скорость движения в непосредственной близости подового электрода. Так, при понижении температуры

подового электрода до температуры плавления стали, скорость течения на уровне сдвигового подслоя снижается на 20 %.

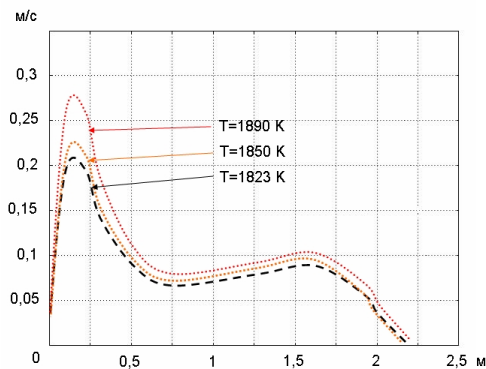


Рис. 3. Зависимость скорости движения расплава на уровне сдвигового подслоя при разных температурах подового электрода от расстояния до оси симметрии

Выводы

Рассмотрены физические процессы в дуговой сталеплавильной печи постоянного тока с подовым электродом. Показано, что пространственное распределение тока и температуры в печи приводит к вихревому движению расплавленного металла. Для описания процессов в электрической печи адаптирована модель магнитной гидродинамики, которая учитывает пространственное распределение тока, электрического и магнитного полей, силы Лоренца, джоулева тепла, температуры и скорости движения расплава. Разработана стратегия решения поставленной сопряженной задачи в рамках стандартных пакетов программ. Поставлена и решена модельная задача для цилиндрической дуговой печи постоянного тока с подовым электродом.

Установлено, что сила Лоренца составляет около 30 % от объемной силы тяжести и играет определяющую роль в возникновении вихревого движения расплава, максимальной скоростью которого достигает 0,5 м/с. При сравнении результатов для изотермического и неизотермического движения расплава выяснено определяющее действие объемной электромагнитной силы и существенное влияние конвективных потоков при максимальной тепловой мощности печи.

Результаты расчетов в ANSYS сравнивались с экспериментальными данными и расчетами в COMSOL. Хорошее согласование результатов расчетов разными методами и пакетами, а также экспериментальными

данными говорит о надежности методов и достоверности полученных результатов.

Показана возможность снижения скорости движения расплава в непосредственной близости поверхности футеровки на 20 % путем снижения температуры подового электрода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев В. А. Подовые электроды дуговых печей постоянного тока / В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар // Современная электрометаллургия. — 2009. — № 2. — С. 3—8.
2. Нехамин С. М. Дуговые печи постоянного тока — высокоэффективные плавильные агрегаты / С. М. Нехамин, М. М. Крутянский, А. К. Филиппов // Литейщик России. — 2005. — № 5. — С. 25—26.
3. Тищенко П. И. Подовый электрод с жидкометаллическим теплоносителем для дуговой печи постоянного тока / П. И. Тищенко, С. Н. Тимошенко, С. Ю. Пасечник, А. П. Тищенко, А. Ю. Пасечник // Наукові праці ДонНТУ, Металургія. — 2011. — Випуск 12 (177). — С. 164—170.
4. Direct current arc furnace and a method for melting or heating raw material or molten material Пат. 6137822 США, МПК 7 F 27 D 1/00. NKK Steel Engineering, Inc., Hake Joseph L., Cook Richard L. N 09/032442.
5. Таблицы физических величин. Справочник. // Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат. — 1976. — 1008 с.
6. Kazak O. Modelling Vortex Fields in Metal Smelting Furnaces / O. Kazak, O. Semko // The International Journal of Multiphysics. — 2010. Volume 4. Number 4. — P. 351—358.
7. Kazak O. Electrovortex field in DC arc steel making furnaces with bottom electrode / O. Kazak, O. Semko // Ironmaking and Steelmaking. — 2011, Volume 38. Number 4. — P. 273—278.
8. Kazak O. Modelling magnetohydrodynamic processes in DC arc steel making furnaces with bottom electrodes / O. Kazak, O. Semko // Ironmaking and Steelmaking. — 2011. Volume 38. Number 5. — P. 353—358.
9. Казак О. В. Электровихревое движение расплава в печах постоянного тока с подовым электродом / О. В. Казак, А. Н. Семко // Инженерно-физический журнал. — 2011. Том 84. №1. — С. 209—217.