УДК 621.745; 35.014.31

Л.Н.НИКИТИНА, *канд. техн. наук, инженер, (812) 328-84-31*
А.П.СУСЛОВ, *проректор по эксплуатации имущественного комплекса, (812) 327-73-58*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
А.А.ПЕДРО, *д-р техн. наук, профессор, pedro1938@mail.ru*
ООО «Ленгипрохим», Санкт-Петербург
В.В.ВАСИЛЬЕВ, *канд. техн. наук, главный специалист, (812) 448-80-06*
ЗАО «ПитерГОРпроект», Санкт-Петербург

L.N.NIKITINA, *PhD in eng. sc., engineer, (812) 328-84-31*
A.P.SUSLOV, *prorektorof the property complex exploitation, (812) 327-73-58*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg
A.A.PEDRO, *Dr. in eng. sc., professor, pedro1938@mail.ru*
«Lengiprochim» Co, Saint Petersburg
V.V.VASILEV, *PhD in eng. sc., chief specialist,* (812) 448-80-06
«Pitergorproeckt» Co, Saint Petersburg

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТАВА РАСПЛАВА НОРМАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОКОРУНДА

Показана возможность контроля состава расплава по постоянной составляющей фазного напряжения.

Ключевые слова: рудно-термическая печь, корунд, электрическая дуга, вентильный эффект, постоянная составляющая напряжения.

USE OF PHASE VOLTAGE DC – COMPONENT FOR CONTROL OF MELTING REGULAR ALUMINA COMPOSITION

A capability of control of melting alumina composition by means of a value of phase voltage dc component is shown.

Key words: ore-smelting furnace, arc, corund, electrical valve-like action, dc component of voltage.

Ряд рудно-термических процессов сопровождается образованием в печи продуктов, обладающих высокой электропроводностью. Поэтому для поддержания установленных условиями плавки силы тока и напряжения на протяжении всего процесса или на его отдельных стадиях печь работает при наличии дуги. Однако в отличие от сталеплавильных печей, где практически все тепло выделяется в дуге, в рудно-термических печах в дуге выделяется не более половины подаваемой в печь энергии. Дуговой режим в данном случае носит отрицательный характер, так как сопровождается увеличением теплопотерь с открытого колошника печи, повышением пыленоса из печи, в том числе и целевых компонентов. Однако слабая изученность некоторых процессов и эксплуатационные ограничения не позволяют в настоящее время перейти к бездуговому режиму. Примером такого процесса может служить плавка нормального электрокорунда.

Для получения нормального электрокорунда боксит (агломерат) подвергают плавке с углеродистым восстановителем, в про-

цессе которой происходит восстановление оксидов, главным образом, железа, кремния и титана. Плавка ведется периодическим способом с раздельным выпуском ферросплава и высокоглиноземистого расплава. Периодичность процесса выплавки электрокорунда обусловлена несоответствием между температурами плавления исходной шихты (1950 К) и конечного продукта (2350 К).

Невозможность осуществления непрерывной плавки нормального электрокорунда при закрытом колошнике объясняется тем, что высокоглиноземистый расплав может быть получен в жидкотекучем состоянии только после проплавления всей шихты на колошнике печи. С увеличением мощности, подаваемой на печь, будет увеличиваться количество проплавляемой шихты и температура расплава не будет повышаться до тех пор, пока не проплавится весь колошник. Именно поэтому электропечь для плавки нормального корунда работает в двух режимах:

• в режиме сопротивления, когда электроды погружены на ту или иную глубину в слой шихты или шлака; это происходит в первой половине процесса на стадии расплавления шихты;

• в режиме с электрической дугой, на стадии доводки расплава.

Дуга появляется в конце стадии расплавления и достигает своего максимального развития при выпуске расплава корунда из печи. Наличие дуги вызвано тем, что, хотя восстановление оксидов железа и кремния заканчивается к моменту вскрытия колошника, электрокорунд удается выпустить только после значительного перегрева расплава, несмотря на сравнительно малую вязкость расплавленного глинозема в точке плавления. Расплавленный глинозем – хороший проводник электрического тока, поэтому для сохранения мощности, подаваемой в печь, перегрев расплава (доводку) ведут на прежнем уровне при наличии электрической дуги. В конце плавки в ней выделяется до 20 % энергии, подаваемой в печь. Конечно, с развитием дуги увеличиваются тепловые потери с колошника, пыле- и газоунос из печи, однако в настоящее время работа без дуги невозможна.

Наиболее важный момент плавки нормального электрокорунда – определение готовности расплава, т.е. момента начала выпуска его из печи. Передержка расплава в печи приводит к его перевосстановлению, к дополнительному расходу электроэнергии. При раннем выпуске расплав недовосстановлен, вязок и плохо выходит из печи.

Еще недавно момент выпуска расплава из печи определялся чисто субъективно – по внешнему виду так называемой штанговой пробы. Для этого плавильщик в конце плавки опускал в расплав металлическую штангу и по характеру налипшего корунда (цвет, наличие включений углерода) определял степень готовности расплава. Таким образом, качество получаемого корунда и экономические показатели зависели от опыта обслуживающего персонала.

В настоящее время момент выпуска корунда из печи определяется по постоянной составляющей фазного напряжения.

Как известно, при определенных условиях дуга переменного тока обладает выпрямляющим, т.е. вентильным эффектом, который проявляется в том, что с изменением полярности дуги меняется ее сопротивление, т.е. в один полупериод падение напряжения на дуге выше, чем в другой [6]. Этот эффект особенно ярко выражен в сварочных дугах [4] и может иметь место в сталеплавильных или иных печах, работающих при наличии дуги [1-5].

Большинство авторов [1] склоняется к тому, что механизм этого эффекта кроется в приэлектродных процессах.

Исходя из известного положения о постоянстве мгновенных значений напряжения дуги переменного тока, существование постоянной составляющей ($U_{пс.д}$) в напряжении дуги переменного тока можно объяснить разницей этих значений в полупериоды:

$$U_{пс.д} = U_{д1} - U_{д2}, \quad (1)$$

где $U_{д1}$ и $U_{д2}$ – падение напряжения на дуге в соседних полупериодах.

В свою очередь

$$U_{д1} = U_{ак1} + U_{ст1}; \quad (2)$$

$$U_{д2} = U_{ак2} + U_{ст2}, \quad (3)$$

где $U_{ак1}$ и $U_{ак2}$ – суммы падений напряжения в прианодном и прикатодном пространствах в соседних полупериодах; $U_{ст1}$ и $U_{ст2}$ – падение напряжения в столбе дуги в соседних полупериодах.

Заменив в уравнении (1) значения $U_{д1}$ и $U_{д2}$ равными им выражениями (2) и (3), получим

$$U_{пс.д} = U_{ак1} + U_{ст1} - U_{ак2} + U_{ст2}.$$

Так как падение напряжения в столбе дуги не зависит от тока ($U_{ст1} = U_{ст2}$), то

$$U_{пс.д} = U_{ак1} - U_{ак2} = \Delta U_{ак}.$$

Таким образом, величина постоянной составляющей напряжения дуги обусловлена разницей прианодных и прикатодных падений напряжения в соседних полупериодах и не зависит от длины и тока дуги.

Это и наблюдается в сталеплавильных печах, где перемещения электродов сопровождаются изменением тока и не сказываются заметным образом на изменении постоянной составляющей фазного напряжения, измеряемой в цепи электрод-земля.

Иная картина существования постоянной составляющей фазного напряжения, обусловленной вентильным эффектом дуги переменного тока, наблюдается в рудно-термических печах. На печах с открытой дугой с увеличением тока, вызванного перемещением электрода или переключением ступеней напряжения печного трансформатора, значение постоянной составляющей фазного напряжения падает, а с уменьшением тока растет. Эта зависимость постоянной составляющей фазного напряжения от тока в этом случае носит линейный характер.

Отличие изменения $U_{пс}$ на сталеплавильной печи от изменения в рудно-термической, работающей с открытой дугой, объясняется тем, что электрическое сопротивление сталеплавильной печи представляет практически только сопротивление электрической дуги, в то время как в рудно-термической печи дуга горит на расплав или шихту. Сопротивление расплава или шихты, образующих ванну рудно-термической печи, намного превышает сопротивление металла в ванне сталеплавильной печи и составляет значительную часть общего электросопротивления печной ванны и печного контура. Вследствие этого изменение тока дуги, в напряжении которой существует постоянная составляющая, сопровождается изменением падения напряжения постоянного тока на сопротивлении расплава или шихты, на которые горит дуга, что и вызывает изменение $U_{пс}$, фиксируемого в цепи электрод-земля:

$$U_{пс} = U_{пс.д} - aRI, \qquad (4)$$

где I – ток электрода, равный току дуги; R – электросопротивление расплава или шихты, на которые горит дуга; $a = \Delta j/j_{ср}$ – отношение разницы плотностей эмиссионного тока в соседних полупериодах к средней плотности тока дуги.

Регулярный характер изменения величины постоянной составляющей в процессе плавки нормального электрокорунда и был положен в основу контроля состава расплава корунда и определения момента начала выпуска его из печи [4].

После окончания предыдущего выпуска и загрузки шихты в период ее проплавления печь практически все время работает в режиме сопротивления, электрическая дуга отсутствует. Отдельные всплески на диаграмме регистрирующего прибора в этот период объясняются возникновением кратковременных дуг при образовании пустот под электродами из-за плохого схода шихты или шлакования ванны.

После расплавления шихты в результате дальнейшего нагрева для придания расплаву жидкотекучего состояния, необходимого для выпуска из печи, его электрическое сопротивление уменьшается. Регулирующее устройство, поддерживающее постоянной силу тока в электродах, постепенно выводит их из расплава, и рано или поздно возникает электрическая дуга. Вначале она носит закрытый характер и горит под торцом электрода в слое расплава. С возникновением электрической дуги в фазном напряжении появляется постоянная составляющая, обусловленная вентильным эффектом, вызванным в данном случае повышенной по сравнению с расплавом эмиссией электронов из электрода. Это объясняется тем, что темпера-

тура катодного пятна на расплаве в результате конвективного тепло- и массообмена меньше температуры катодного пятна на твердом электроде.

В измерительной цепи постоянная составляющая имеет направление от электрода к «земле», т.е. падение напряжения на дуге меньше в тот полупериод, когда катодом служит электрод. В этот же полупериод ток дуги больше и падение напряжения постоянного тока на расплаве и короткой сети, обусловленное разницей токов дуги в полупериоды, будет вычитаться из напряжения, вызванного разницей приэлектродных падений напряжения в соседних полупериодах. Это подтверждается тем, что с уменьшением тока дуги при подъеме электродов уменьшается разница токов дуги в полупериоды и, соответственно, переменное слагаемое в правой части того же уравнения.

По мере проплавления шихты, повышения температуры расплава и, как следствие, уменьшения его электрического сопротивления горение дуги принимает открытый характер. Постоянная составляющая растет, так как катодное пятно на поверхности расплава охлаждается в большей степени, чем раньше, когда горение дуги носило закрытый характер. Догрузка шихты в этот момент с целью корректировки расплава или обрушения шихты приводит к уменьшению значения постоянной составляющей: снижая температуру расплава, увеличивают его электросопротивление и долю энергии, выделяемой в нем. Соответственно уменьшается мощность дуги.

Снижение постоянной составляющей вплоть до нулевого значения происходит и при так называемом «кипении» расплава, вызываемом бурным выделением газов при попадании свежей шихты в уже перегретый расплав. Это значит, что «кипящий» расплав, омывая электрод, шунтирует дугу.

Периодический выпуск образующегося в качестве побочного продукта ферросилиция (один раз на три-четыре выпуска расплава корунда) не отражается на величине постоянной составляющей. Электропроводность расплава ферросилиция в несколько раз больше электропроводности расплава корунда и практически не сказывается на общем сопротивлении печного контура.

Для определения связи постоянной составляющей фазного напряжения с электротехнологическими параметрами работы печи после проплавления колошника отбирались штанговые (ломковые) пробы при одновременном замере величины постоянной составляющей фазного напряжения, силы тока в электроде и ступени напряжения печного трансформатора. В штанговых пробах определялось содержание Al_2O_3, CaO, SiO_2, Fe_2O_3, MgO и TiO_2.

Обработка большого числа данных показала, что изменение постоянной составляющей фазного напряжения не зависит от этого напряжения, но имеет вполне определенную зависимость от тока электрода и содержания ряда компонентов в расплаве, которая не всегда носит достаточно явный характер. Так, отмеченная незначительная корреляция между содержанием Fe_2O_3 и постоянной составляющей объясняется тем, что металлическая штанга в процессе отбора пробы, взаимодействуя с расплавом, может увеличивать содержание железа в пробе. Кроме того, существующий пересчет концентрации оксидов железа на Fe_2O_3 не совсем правилен, так как при высоких температурах и наличии углеродистого восстановителя существование оксида железа в виде Fe_2O_3 маловероятно. Оксид кальция при электроплавке корунда практически не восстанавливается и остается в расплаве, значительную трудность представляет восстановление низших оксидов титана.

Однако связь постоянной составляющей фазного напряжения с главным компонентом, определяющим готовность расплава – Al_2O_3, в рабочих пределах его содержания, т.е. до 95 %, имеет высокую корреляцию и носит линейный характер (рис.1).

Зависимость постоянной составляющей напряжения от тока носит также линейный характер на всем протяжении плавки, однако ее абсолютная величина и наклон зависимости определяются содер-

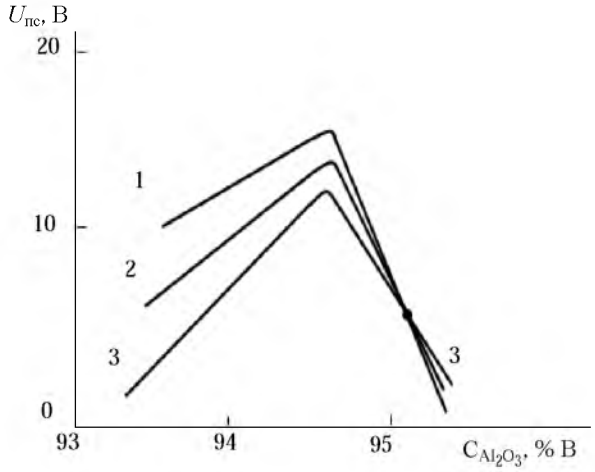


Рис.1. Зависимость постоянной составляющей фазного напряжения от содержания Al_2O_3 в расплаве нормального электрокорунда; ток электрода, А

1 – 33200; 2 – 29900; 3 – 26600

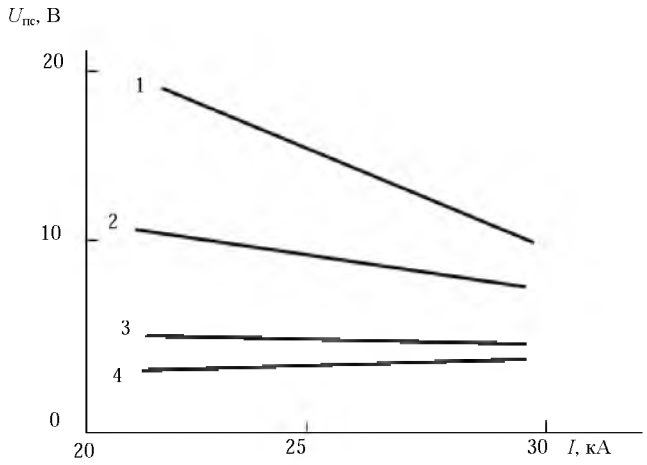


Рис.2. Зависимость постоянной составляющей фазного напряжения от тока на печи РКО-10,5 для плавки нормального электрокорунда при различном содержании Al_2O_3, %

1 – 94,5; 2 – 93,5; 3 – 95,5; 4 – 96

жанием Al_2O_3 в расплаве (рис.2). При содержании в расплаве 95,5 % Al_2O_3 постоянная составляющая не зависит от тока и равна 4,7 В – работа выхода электронов из расплава Al_2O_3. Это говорит о том, что токи дуги в полупериоды одинаковы, т.е. термоэмиссия электронов из расплава в результате повышения его температуры сравнялась с термоэмиссией из электрода. При дальнейшем увеличении Al_2O_3 в расплаве эта зависимость меняет наклон. Это свидетельствует в пользу того, что уже эмиссия электронов из расплава с дальнейшим перегревом превалирует над эмиссией электронов из электрода. Вызванное разницей токов падение напряжения в расплаве и короткой цепи будет иметь то же напряжение, что $U_{пс.д}$ и поэтому суммарная постоянная составляющая будет с уменьшением тока электрода также уменьшаться (кривая 4 на рис.2).

Отмеченная зависимость постоянной составляющей фазного напряжения от содержания Al_2O_3 была использована для оценки состава расплава и определения момента начала выпуска его из печи. Так, было установлено, что при работе печи РКЗ-10,5 на 3-й ступени печного трансформатора и токе электрода 33,2 кА при $U_{пс}$ = 7,5 В расплав содержит 94,5 % Al_2O_3, т.е. можно начинать выпуск.

При работе печи на 4-й или 5-й ступенях печного трансформатора, т.е. номинальных токах электрода 29,9 и 26,6 кА выпуск следует начинать при значениях постоянной составляющей 11 и 14,5 В соответственно.

Данный метод определения начала выпуска расплава был внедрен на всех промышленных печах для получения нормального электрокорунда.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Марков Н.А.* Эксплуатационный контроль электрических параметров дуговых электропечей / Н.А.Марков, О.В.Баранник. М., 1973.

2. *Педро А.А.* Гармонический состав тока рудно-термических печей химической технологии / А.А.Педро, М.П.Арлиевский, В.А.Ершов // Электротехника. 1996. № 4.

3. *Педро А.А.* Вариации постоянной составляющей фазного напряжения в рудно-термических печах для получения фосфора и карбида кальция / А.А.Педро, М.П.Арлиевский, Р.В.Куртенков // Электрометаллургия. 2009. № 4.

4. *Педро А.А.* Постоянная составляющая фазного напряжения при плавке циркониевого электрокорунда /

А.А.Педро, М.П.Арлиевский, Р.В.Куртенков // Электрометаллургия, 2011. № 7.

5. *Сотников В.В.* Автоматизированное управление рудно-термической печью производства нормального электрокорунда / В.В.Сотников, А.А.Педро, Л.Н.Никитина/ СПб, 2003.

6. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / А.Д.Свенчанский, И.Т.Жердев, А.М.Кручинин и др. / Под ред. А.Д.Свенчанского. М., 1981.

REFERENCES

1. *Markov N.A., Barannik O.V.* Operational control of electrical parameters of electric arc furnaces. Moscow. 1973.104 p.

2. *Pedro A.A.* Harmonic currents ore-smelting furnace of chemical technology / A.A.Pedro, M.P.Arlievskiy, V.A.Ershov // Electrical Engineering. 1996. N 4.

3. *Pedro A.A.* Variations DC phase voltage in ore-smelting furnaces for phosphorus and calcium carbide / A.A.Pedro, M.P.Arlievsky, R.V.Kurtenkov // Electrometallurgy. 2009. N 4.

4. *Pedro A.A.* The constant component of the phase voltage in smelting alumina zirconia / A.A.Pedro, M.P.Arlievsky, R.V.Kurtenkov // Electrometallurgy. 2011. N 7.

5. *Sotnikov V.V.* Automated control of ore-smelting furnace normal corundumproduction / V.V.Sotnikov, A.A.Pedro, L.N.Nikitina. Saint Petersburg. 2003.

6. Elektricheskie Industrial Furnaces: Arc furnaces and special heating: Textbook for high schools / A.D.Svenchansky, I.T.Zherdev, A.M.Kruchinin et al. / Ed. A.D.Svenchanskogo. Moscow, 1981.