

**А.П.СУСЛОВ**, проректор по эксплуатации имущественного комплекса, (812) 327-73-58  
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

**A.P.SUSLOV**, prorektor of the property complex exploitation, (812) 327-73-58  
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

## **НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ВАННЕ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ**

Рассматриваются современные методы контроля и управления рудно-термическими печами.

**Ключевые слова:** рудно-термическая печь, контроль, управление.

## **MODERN METHODS OF MONITORING AND CONTROL BASED ON ELECTROPHYSICAL AND ELECTROCHEMICAL PHENOMENA IN ORE-SMELTING FURNACE BATH**

Reviews modern methods of ore-smelting furnaces monitoring and control.

**Key words:** ore-smelting furnace, monitoring, control.

Рудно-термические электропечи (РТП) представляют собой достаточно сложные объекты управления. Сложность создания системы управления состоит в тесной взаимосвязи технологических и электрических процессов в ванне печи. Под технологическими имеются в виду физические процессы, т.е. фазовые превращения, и химические реакции, в результате которых образуются новые вещества. Для обеспечения этих процессов требуется подвод энергии, который осуществляется посредством преобразования электрической энергии в тепловую, т.е. электрофизическим процессом. Так как в РТП имеет место контакт электродов с расплавом, то возможно и прямое превращение электрической энергии в химическую, т.е. электрохимические процессы – электролиз. Однако последние играют незначительную роль в энергетическом балансе электропечи.

Таким образом, ванну РТП можно рассматривать и как химический реактор, и как электрический теплогенератор. Характер химического реактора так называемой реакци-

онной зоны определяют технологические параметры: количественный и качественный состав материалов, образующих эту зону, гранулометрический состав твердых материалов, температура в этой зоне, количество и состав расплава. Характер зоны, как теплового генератора, определяет ее электросопротивление, зависящее от размеров зоны, температуры, количества жидких и твердых компонентов в ней и их гранулометрического состава. В свою очередь от электросопротивления реакционной зоны зависят ток, напряжение, потребляемая мощность, т.е. так называемые электрические параметры работы печи. В совокупности электрические и технологические параметры принято называть электротехнологическими, причем они теснейшим образом связаны между собой.

Так, изменение количества восстановителя в зоне тепловыделения ведет не только к изменению ее электросопротивления, распределения мощности и температуры в ней, но и соответственно к скорости химических процессов в реакционной зоне, составу по-

лучаемого расплава и отходящих газов. При этом состав образующегося расплава ведет к изменению электросопротивления реакционной зоны.

Таким образом, эффективность и стабильность работы печи зависят от условий протекания электрофизических и технологических процессов, определяемых электро-технологическими параметрами, и задача управления работой РТП сводится к стабилизации этих параметров на оптимальном уровне.

Физико-химические процессы, происходящие в ванне, не поддаются непосредственному контролю, поэтому у оператора нет полной информации о степени их развития и эффективности. Активное сопротивление шихты и расплава в ванне печи, количество углеродистого материала и расплава в ней, степень развития дугового режима, состав расплава до момента его выпуска невозможно определить из-за агрессивной среды и высокой температуры в реакционной зоне. Остается неопределенным и характер изменения этих параметров. Все это, а также недостаточная изученность рудно-термических процессов, создает определенные трудности при разработке эффективных систем управления.

Существующий в настоящее время уровень управления и автоматизации РТП не соответствует современным требованиям, реализуется в основном только централизованный сбор доступной для контроля информации и регулирование электрического режима осуществляется с учетом этой информации, в том числе и на основе опыта операторов печной установки. Отсутствие оперативности при получении информации о размере реакционной зоны, количестве восстановителя в ней и составе расплава, а также необходимость в последнем случае использования усредненного измерения (вследствие недостоверности единичного результата) и т.п. приводят к нестабильности электротехнологического режима, перерасходу электроэнергии и потерям сырья вследствие запаздывания при формировании управляющих воздействий.

Хотя прямое определение большинства технологических параметров невозможно,

однако отмеченная связь этих параметров с электрическими, а также то, что состояние реакционной зоны отражается на ее свойствах как токопроводящей среды, позволяет оценивать ход технологического процесса по изменениям электрических параметров, дополняя их данными о температуре газов на выходе из печи, в различных точках футеровки, охлаждающей воды, периодически получаемыми результатами о составе шлака и т.д. Часть этой информации либо приходит с большим опозданием, либо не имеет прямого отношения к реакционной зоне, а служит только для контроля функционирования тех или иных узлов и элементов печи.

При этом состояние реакционной зоны проявляется не только в характере фазовых и химических превращений, но и в характере преобразования электрической энергии в тепловую. Однако значения тока и напряжения, отражаемые контрольными щитовыми приборами, ничего не говорят о распределении мощности в печи, размерах и составе реакционной зоны, уровне и составе расплава, положении электрода относительно этого уровня.

Под распределением мощности в объеме печи подразумевается не только распределение мощности в объеме ванны печи, но и распределение мощности между электрической дугой, шунтирующим ее сопротивлением шихты и расплавом, на который горит дуга. Это распределение для каждого технологического процесса носит оптимальный характер. Так, в ряде технологических процессов (производство фосфора, карбида кальция) излишнее развитие дуги сопровождается интенсификацией нежелательных побочных процессов: разложением целевого продукта – карбида кальция, повышением пылеуноса и т.д.

Наоборот, в процессах, где требуется предварительная газификация одного из компонентов (получение кремния), слишком малая мощность, выделяемая в дуге, ведет к снижению эффективности работы печи. Тот факт, что реакционная зона одновременно является и зоной, в которой происходит преобразование и характером которой определяются электрофизические и электрохи-

мические процессы, может быть использован для контроля и управления работой печи.

Дело в том, что материалы в реакционной зоне находятся в разном агрегатном состоянии: твердом (шихта), жидком (расплав) и газообразном. Прохождение тока в каждом из этих случаев имеет свои особенности и отражается, прежде всего, на зависимости падения напряжения от тока. Если зависимость падения напряжения от тока на твердом проводнике линейна и подчиняется закону Ома, то при прохождении тока через дугу падение напряжения на ней не зависит от тока и носит нелинейный характер.

Контакт электрода с расплавом сопровождается электрохимическими процессами на поверхности этого контакта и появлением постоянной составляющей в напряжении.

Таким образом, выявление и идентификация отмеченных особенностей при прохождении тока через материалы, которые находятся в реакционной зоне и проявляются в развитии электрофизических и электрохимических процессов, определение их связи с характером этой зоны и процессами, протекающими в ней, может быть использовано для контроля параметров технологического процесса и разработки системы автоматического управления нового поколения.

Так как изменение характера преобразования электрической энергии в ванне печи находит прежде всего отражение в осциллограммах напряжения и тока электродов, т.е. в их гармоническом составе, то еще во второй половине XX в. предпринимаются попытки оценки количества углерода в реакционной зоне и ряда других параметров электродных печей на основе гармонического состава напряжения и тока электродов.

Так, В.Н.Никольским была отмечена перспективность использования электрофизических явлений, существующих в ванне РТП, для оценки хода технологического процесса [5]. В сталеплавильных электропечах преобразование электрической энергии в тепловую из-за низкого электросопротивления материалов, находящихся в ванне печи, происходит практически только в электрической дуге. Поэтому характер горения дуги и явления, сопровождающие ее горе-

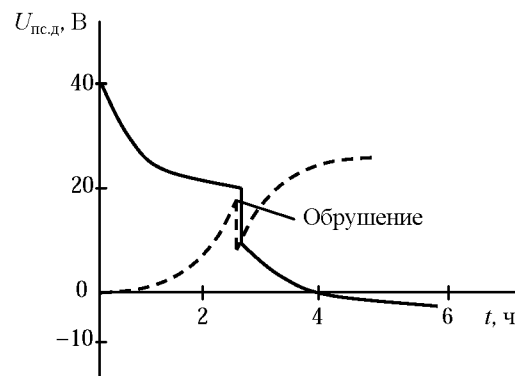


Рис.1. Кривые изменения постоянной составляющей фазного напряжения; сплошная линия – основной процесс, пунктирная – кислый

ние, характеризуют весь технологический процесс, осуществляемый в печи. К таким явлениям, прежде всего, следует отнести вентильный эффект электрической дуги переменного тока.

Условия горения дуги в сталеплавильной печи зависят от полупериодов. В полупериод, когда катод находится на графитированном электроде, температура катодного пятна выше, чем в полупериод, когда это пятно находится на относительно холодном скрапе, тем более, что на плавящемся скрапе оно неустойчиво. Поэтому термоэмиссия (ток в полупериод), когда электрод служит катодом, выше, а падение напряжения меньше, чем в полупериод, когда катодом является скрап. Разница значения постоянной составляющей напряжения меняется по ходу плавки и может достигать 20 В и более. При этом эти изменения зависят от того, кислым или основным является процесс (рис.1).

Во всех случаях в начале плавки, если на металле нет кусков графита, постоянная составляющая напряжения сильно колеблется. (Для увеличения силы тока на скрап нередко укладываются куски графита, условия горения дуги в полупериоды одинаковые, и постоянная составляющая напряжения имеет наименьшее значение.) По мере проплавления колодцев и образования расплава горение дуги носит более устойчивый характер и постоянная составляющая имеет некоторое более или менее постоянное значение для кислого процесса и постоянно уменьшающееся – для основного. Это объясняется тем, что при кислом процессе дуга

горит на шлак, содержащий кремнезем, работа выхода электронов из которого, а следовательно, и падение напряжения, когда шлак является катодом, выше, чем при нахождении на электроде.

При основном процессе работа выхода электронов из известкового шлака почти такая же, как и из графита, однако температура катодного пятна на жидкоподвижном известковом шлаке повышается постепенно и лишь к концу плавки термоэмиссия из него приближается к термоэмиссии из электрода. На постоянную составляющую влияет введение в печь шлакующих или легирующих материалов, вызывающих уменьшение или возрастание ее.

В.С.Князев на основании результатов исследования процесса плавки в дуговых сталеплавильных печах отмечал, что снижение вязкости расплава приводит к увеличению содержания 3-й гармоники в токе электродов, а увеличение в шлаке  $MgO$  ведет к снижению этого содержания, что позволяет контролировать целостность футеровки печи [3]. И.В.Лапшин также показал, что при повышении содержания окиси магния в шлаке уменьшается содержание высших гармоник [4], что связано с увеличением вязкости шлака и, следовательно, с уменьшением его электропроводности и степени развития дуги. Он же на основе анализа гармонического состава тока печей 50 и 199 т показал, что изменение 2, 3, 5 и 7-й гармоник отражает изменение многих технологических параметров: состава и массы шихты, состава и физических свойств расплава, различных аномалий технологического процесса, а также электрического режима.

По результатам многих исследований на рудно-термических печах была отмечена связь гармонического состава тока с количеством углерода в ванне печи. На основании этих исследований норвежской фирмой «Эл-кем» предложен принцип управления процессом плавки ферросилиция по положению электродов и высшим гармоникам тока, свидетельствующим о дисбалансе углерода в ванне печи. Та же связь гармонического состава тока электродов с углеродистым режимом была отмечена и на фосфорных печах [5].

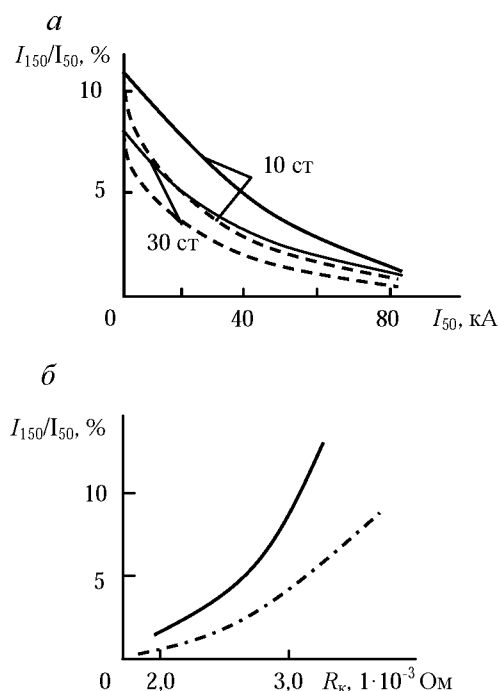


Рис.2. Зависимость относительного содержания в токе электрода печи РКЗ-80Ф гармонической составляющей с частотой 150 Гц от тока (а) и сопротивления печи (б)

На рис.2 показана зависимость относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 150 Гц (3-й гармоники) от величины этого тока и электросопротивления печи. На этом рисунке пунктирные кривые соответствуют данным, полученным при работе печи с меньшим по сравнению с сплошными кривыми содержанием углерода в ванне печи. Это было установлено по положению электродов и содержанию пятиоксида в шлаке. Такой характер полученных зависимостей связан с тем, что с уменьшением содержания углерода в ванне растет ее электросопротивление и, как следствие, при неизменных напряжении и токе уменьшается степень развития дугового режима и характеризующее ее относительное содержание 3-й гармоники.

По величине относительного содержания в токе электродов гармонических составляющих с частотой 150 и 250 Гц была отмечена зависимость белизны получаемого материала и удельного расхода электроэнергии от степени развития электрической дуги и фазового состава проплавляемого глино-

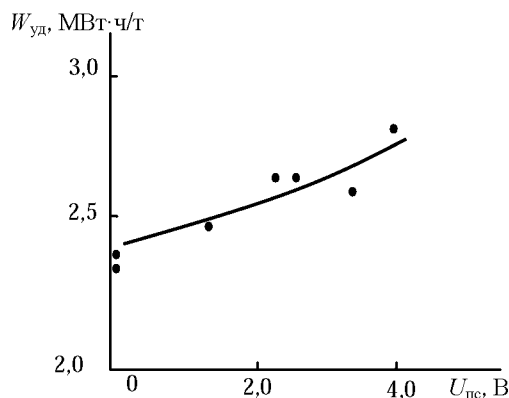


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии при плавке циркониевого электрокорунда от постоянной составляющей фазного напряжения

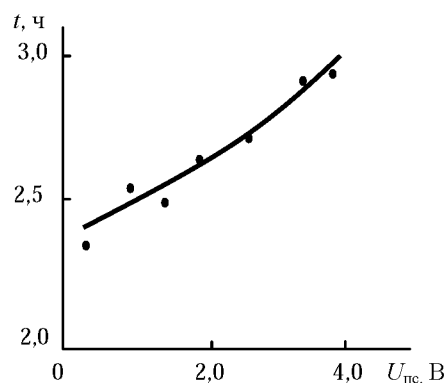


Рис. 4. Зависимость продолжительности плавки циркониевого электрокорунда от постоянной составляющей фазного напряжения

зема [2]. Это позволило предложить способ управления процессом плавки белого электрокорунда [1]. В соответствии с этим способом по величине относительного содержания в токе одного из электродов гармонической составляющей с частотой 250 Гц определяют фазовый состав проплавляемого глинозема ( $\alpha$ -фазы) и затем выбирают оптимальные электрические параметры плавки: напряжение и ток.

На печи для плавки циркониевого электрокорунда было показано, что удельный расход электроэнергии (рис.3) а также продолжительность плавки (рис.4) связаны со средней величиной постоянной составляющей фазного напряжения за время плавки. Поскольку наличие последней в данном случае обусловлено вентильным эффектом дуги переменного тока, то по постоянной составляющей напряжения можно контролировать степень развития дугового процесса и, меняя электрические параметры и дозировку шихты, вести процесс плавки в оптимальном режиме.

На всех заводах бывшего СССР (Челябинск, Запорожье, Юрга), выплавляющих нормальный электрокорунд, был внедрен способ определения момента начала выпуска (готовности) расплава из печи по постоянной составляющей напряжения дуги [7]. Этот способ основан на использовании вентильного эффекта дуги переменного тока, которая существует на стадии доводки расплава [8]. Степень развития дуги зависит от

электросопротивления расплава, на который она горит. На этой стадии это сопротивление определяется температурой расплава, которая, в свою очередь, связана с содержанием в нем  $Al_2O_3$ . С увеличением содержания  $Al_2O_3$  в расплаве падает его электросопротивление и растет степень развития дуги и, соответственно, постоянная составляющая напряжения дуги.

В процессе этих работ впервые выявлена возможность использования для контроля технологического процесса в РТП существования электрохимических явлений на границе электрод-расплавы [6, 9]. В связи с крайне незначительной ролью в тепловом балансе печи электрохимических явлений им не придается должного внимания. Отмечается лишь, что их наличие может вести к загрязнению получаемого продукта, что в отдельных случаях недопустимо.

Однако в процессе исследований на карбидной и фосфорной печах, печах для получения медно-никелевого штейна и плавящихся фосфатов было отмечено, что следствием электрохимических реакций в фазном напряжении может быть постоянная составляющая, величина и характер изменения которой зависят от количества и состава расплава в печи [8]. Это позволяет по ее значениям контролировать уровень, состав и температуру расплава, положение электрода относительно этого уровня [9].

Выявление и идентификация отмеченных особенностей при прохождении элек-

трического тока через реакционную зону, определение связи этих особенностей с характером этой зоны и процессами, протекающими в ней, может быть использовано для разработки нового поколения методов контроля и управления технологическими процессами в рудно-термических печах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1447911 СССР. Способ контроля готовности расплава в электропечи периодического действия / А.А.Педро, А.В.Острогорский, В.А.Писаров и др. 1988. Бюл. № 48.
2. А.с. 1582365 СССР. Способ управления плавкой белого электрокорунда в электродуговой печи / А.А.Педро, Г.М.Жилов, В.В.Работнов и др. 1990. Бюл. № 28.
3. Князев В.С. Исследование и совершенствование электроплавки стали на основе анализа тока дуг: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. ЛПИ им. М.И.Калинина. Л., 1980.
4. Латиш И.В. Автоматизация дуговых печей. М., 2004.
5. Никольский В.И. Выпрямляющее действие дуги трехфазной сталеплавильной печи // Электричество. 1951. № 3.
6. Педро А.А. Гармонический состав тока электродов рудно-термических печей химической технологии / А.А.Педро, В.А.Ершов, М.П.Арлиевский // Электротехника. 1996. № 4.
7. Педро А.А. Вариации постоянной составляющей фазного напряжения в рудно-термических печах для получения фосфора и карбида кальция / А.А.Педро, М.П.Арлиевский // Электromеталлургия. 2009. № 4.
8. Сотников В.В. Автоматизированное управление руднотермической печью производства нормального

электрокорунда / В.В.Сотников, А.А.Педро, Л.Н.Никитина. СПб, 2003.

9. Сотников В.В. Основы автоматизированного управления руднотермической печью при производстве карбида кальция / В.В.Сотников, А.А.Педро, И.В.Авдиенко. СПб, 2001.

#### REFERENCES

1. A.s. 1447911 USSR. Method of control of the melt in the furnace ready batch / A.A.Pedro, A.V.Ostrogorsky, V.A.Pisarev et al. 1988. Bul. N 48.
2. A.s. 1582365 USSR. Method of controlling melting white fused in an electric arc furnace / A.A.Pedro, G.M.Zhilov, V.V.Rabotnov et al. 1990. Bul N 28.
3. Knyazev V.S. Research and improvement of electro steel based on the analysis of current arcs: the author ... PhD in eng. sc. Leningrad, 1980.
4. Lapshin I.V. Automation arc furnaces. Moscow, 2004.
5. Nikolsky V.I. Rectifying action of the three-phase arc furnace // Electricity. 1951. N 3.
6. Pedro A.A. Harmonic currents electrodes in ore-smelting furnace for chemical technology / A.A.Pedro, V.A.Ershov, M.P.Arlyevsky // Electrical Engineering. 1996. N 4.
7. Pedro A.A. Variations DC phase voltage in ore-smelting furnaces for phosphorus and calcium carbide / A.A. Pedro, M.P. Arlyevsky // Electrometallurgy. 2009. N 4.
8. Sotnikov V.V. Automated control of ore-smelting furnace production of normal corundum / V.V.Sotnikov, A.A.Pedro, L.N.Nikitina. Saint Petersburg, 2003.
9. Sotnikov V.V. Fundamentals of automatic control ore-smelting furnace in the production of carbide kaltsiya / V.V.Sotnikov, A.A.Pedro, I.V.Avdienko. Saint Petersburg, 2001.