

Металлургическая и горнорудная[®] ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 536.24:621.643.23

М.В. Губинский /д.т.н./, **С.С. Федоров**/к.т.н./,
Н.В. Ливитан/к.т.н./, *Национальная
металлургическая академия Украины (НМетАУ),
А.Г. Гогоци, Центр материаловедения,*

Igor Barsukov, *American Energy Technologies
CO.,
Upendra (Kumar) Rohatgi*, *Brookhaven National
Laboratory.*

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен анализ эффективности высокотемпературной обработки углеродных материалов в электропечах плотного и кипящего слоя. Определены удельные затраты электроэнергии для печей различных типов и основные направления по совершенствованию их тепловой работы. Определены гидродинамические режимы работы печей электротермического кипящего слоя, обеспечивающие равномерный нагрев материала.

Ключевые слова: *углеродный материал, высокотемпературная обработка, кальцинатор, электротермический кипящий слой.*

Качество металлургической продукции напрямую зависит от характеристик применяемых шихтовых и расходных, в том числе, и углеродных, материалов. Особенно существенно это проявляется, например, при получении алюминия, где на 1 т готового продукта в электролизерах расходуется 450–500 кг самоспекающегося углеродного анода, а также в электросталеплавильном производстве, где расход графитированных электродов составляет 4,5–10 кг на тонну электростали [1].

Таким образом, повышение качества расходных углеродных материалов непосредственно влияет на основные показатели и совершенствование металлургических технологий. Это объясняет значительный интерес металлургов к агрегатам и процессам подготовки углеродных материалов [2-4]. Основными тенденциями развития производства углеродных материалов являются повышение их качества, в первую очередь, за счет повышения чистоты самих материалов, а также разработка и внедрение энергоэффективных методов их термической обработки [5,6].

Исходным сырьем для производства углеграфитовых изделий являются нефтяной кокс, антрацит, природный графит. Суть технологического процесса сводится к нагреву исходного материала до температуры 2000°C - 2700°C с последующей выдержкой, в процессе которой наблюдается частичная графитизация исходного сырья, удаление серы, летучих

продуктов, металлов и их оксидов, входящих в состав золы, в том числе ванадия, попадание которого, например, в алюминий приводит к снижению его электропроводности [6].

Известные печные агрегаты для высокотемпературной обработки углеродных материалов с использованием внешнего нагрева (газового и электрического) [5,6] обеспечивают термическую обработку сырья до температуры не более 900°C-1400°C. При этом удельное электросопротивление обработанного материала снижается с уровня 10000 мкОм·м до 1000 мкОм·м [5]. Это позволяет использовать на финишной стадии тепловой обработки высокотемпературный резистивный электронагрев в слое. В настоящее время известны два основных теплотехнологических процесса высокотемпературной обработки углеродного материала: при нагреве в плотном и кипящем слое.

Процесс нагрева в плотном слое реализуется в электрокальцинаторах (рис.1), где предварительный разогрев сырого материала до 900°C и последующий резистивный нагрев до температур 2000°C осуществляется в одном агрегате путем пропускания тока между верхним и нижним электродами непосредственно через плотный слой угля с размерами частиц 6-25мм. Именно такой вариант технологии используется на ведущем в Украине предприятии производителе электродов ПАО «Укрграфит».

Металлургическая и горнорудная[®] ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В электрокальцинаторе шахтного типа реализуется непрерывный технологический процесс при последовательном движении слоя материала через зоны нагрева, прокалики, охлаждения. Процесс высокотемпературного резистивного нагрева определяется мощностью и распределением источников теплоты, то есть распределением силы тока по радиусу и высоте слоя материала, находящегося между электродами. Исследования, проведенные в промышленных условиях, показали, что в процессе электронагрева наблюдается

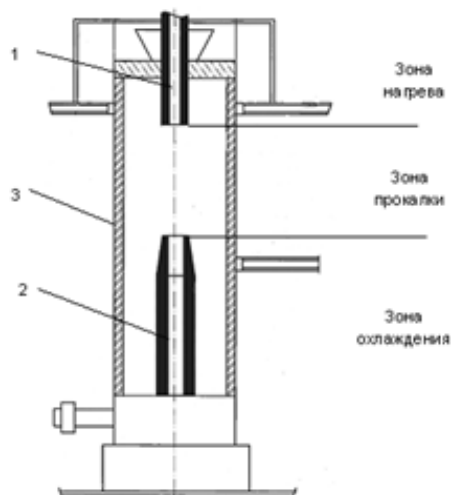


Рис.1 Схема электрокальцинатора [5]

- 1 - верхний электрод,
- 2 - нижний электрод,
- 3 - футеровка

неравномерное распределение источников теплоты как по высоте, так и по радиусу электрокальцинатора [8]. Это вызывает перегрев центральной части антрацита, находящегося у электродов, что в свою очередь приводит к увеличению неравномерности распределения силы тока по радиусу, так как с увеличением температуры удельное электросопротивление слоя антрацита снижается [5]. В результате качество готовой продукции (термоантрацита), двигающегося на периферии у футеровки электрокальцинатора, не удовлетворяет поставленным требованиям в связи с заниженной температурой обработки. Это приводит к необходимости использовать повторную обработку материала в кальцинаторе (двухстадийный режим), что значительно увеличивает энергозатраты до уровня 1360-1380

кВтч/т готового продукта. Решение проблемы возможно двумя путями: рациональным расположением электродов [4] и изменением профиля рабочего пространства [5]. Так уменьшение расстояния между электродами до 1500 мм обеспечивает возможность проведения одностадийного процесса прокалики с удельным расходом энергии 1300-1330кВтч [4]. Изменение профиля рабочего пространства с установкой пережима (дросселя) в зоне прокалики обеспечивает «перемешивание» угля при его вертикальном движении и обеспечивает равномерное распределение силы тока в суженном сечении шахты электрокальцинатора. Все это позволило повысить качество нагрева, перейти на одностадийный режим прокалики и снизить затраты электроэнергии до 500-600кВтч/т готовой продукции. Аналогичный результат получен на оборудовании фирмы ELKEM [5] при переходе на овальное сечение шахты кальцинатора и горизонтальное расположение электродов. При этом удельный расход электроэнергии не превышал 500 кВтч/т.

Таким образом, использование шахтных электрокальцинаторов обеспечивает получение термоантрацита заданного электросопротивления при удельных затратах электроэнергии 1380-500кВтч/т. При этом для энергетического обеспечения процесса используется частичное сжигание исходного сырья за счет подсосов воздуха в рабочее пространство печи [5]. Однако, температура обработки углеродного сырья, указываемая производителями, составляет 2000°C. Косвенно уровень температур обработки подтверждается типом используемых для футеровки кальцинатора муллитокорундовых огнеупоров с температурой размягчения 1580-1600°C. Увеличение температуры обработки на печах подобного типа требует их коренной реконструкции.

Альтернативой процессу высокотемпературной обработки в плотном слое является использование печей с электротермическим кипящим слоем [7-10]. Для реализации данного процесса высокотемпературного нагрева (2500-2700°C) углеродного материала необходимо использование нейтральной газовой атмосферы, исключающей интенсивное химическое взаимодействие газов с футеровкой печи из графитовых блоков. Учитывая это, промышленная компания AMERICAN ENERGY TECHNOLOGIES CO. (ATEC) предложила двухстадийную технологию прокалики нефтяного

Металлургическая и горнорудная[®] ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

кокса, включающую первую стадию - нагрев исходного сырья до температуры 900-1200°C с целью удаления основной части летучих продуктов, и вторую стадию - высокотемпературную обработку кокса в печи с электротермическим кипящим слоем при температуре до 2700°C.

Первая стадия обработки может осуществляться в печах с газовым нагревом

(вращающиеся, циклонные) или в печах косвенного электронагрева (вращающиеся муфельные, с пульсирующим или тарельчатым подом), а также в печи резистивного нагрева с системой утилизации теплоты готового продукта [5,6]. Сравнение удельных затрат энергии для первой стадии обработки углеродного сырья представлены в таблице 1.

Таблица 1. Удельные энергозатраты при кальцинации нефтяного кокса

Тип печи	Печи с газовым отоплением (вращающиеся, циклонные)	Печи с косвенным электронагревом (вращающиеся муфельные, с пульсирующим или тарельчатым подом)	Печь с резистивным нагревом
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	925 -850	890-400	200-100

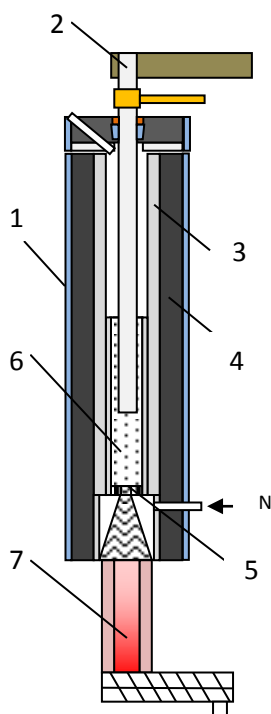


Рис.2 Схема печи с электротермическим кипящим слоем
1 – водоохлаждаемый корпус печи, 2 – центральный электрод, 3 – графитовая футеровка печи (периферийный электрод), 4 – тепловая изоляция, 5 – газораспределительная решетка, 6 – кипящий слой материала, 7 – холодильник.

Увеличение энергозатрат на печах с газовым отоплением связано в первую очередь с дополнительными потерями энергии за счет теплоты,

уносимой продуктами сгорания, уходящими из рабочего пространства печи.

Для реализации второй стадии нагрева используют печь, принципиальная схема, которой приведена на рисунке 2. Печь работает непрерывно, материал поступает в кипящий слой из углеродного материала 6 с размерами частиц 0,2-2мм. Слой нагревается за счет прохождения тока от центрального электрода 2 к периферийному электроду 3. Нагретый материал через центральное отверстие газораспределительной решетки 5 поступает в водоохлаждаемый холодильник 7 и далее выгружается из печи с температурой не выше 300°C.

Наличие кипящего слоя решает несколько технологических и технических задач одновременно: позволяет повысить электрическое сопротивление слоя по сравнению с электросопротивлением плотного слоя частиц углеродного материала; обеспечивает вынос летучих компонентов и возгонов при высокотемпературном нагреве из рабочей камеры печи. Анализ данных о величине удельного электрического сопротивления кипящего слоя [7-9] показал, что при переходе от плотного слоя к кипящему величина электросопротивления возрастает в 4-7 раз и в дальнейшем увеличивается при увеличении порозности слоя. С ростом температуры и силы тока электросопротивление снижается. Эти данные могут быть объяснены исходя из механизма проводимости в кипящем слое [8]. Этот механизм связан с образованием контактных цепочек между частицами, их разрушением и повторным образованием, что приводит к значительному тепловыделению в местах контакта частиц. Очевидно, что при увеличении скорости газа, поступающего в слой, и увеличении объема слоя концентрация частиц падает. Соответственно количество контактных

Металлургическая и горнорудная[®] ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

печечек сокращается, и сопротивление слоя растет. В тоже время, при увеличении температуры до уровня

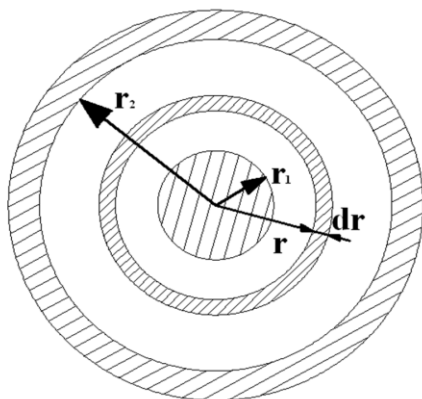


Рис. 3 Схема расположения электродов в печи электротермическим кипящим слоем

2000°C и более возможна ионизация газа и повышение электропроводности слоя за счет увеличения проводимости газовых зазоров между частицами.

Особенность нагрева углеродного материала в печи рассмотренной конструкции (рис.3) связана с изменением площади сечения проводящего слоя при изменении радиуса.

Минимальная площадь соответствует радиусу центрального электрода r_1 . Максимальная - внутреннему радиусу периферийного электрода r_2 . Увеличение площади приводит к изменению электрического сопротивления, величина которого для элементарного слоя dr имеет вид

$$dR = \rho \frac{dr}{S},$$

где: R – сопротивление, Ом;
 ρ – удельное электрическое сопротивление кипящего слоя материала, Ом·м;
 $S=2\pi r h$ – площадь слоя, перпендикулярного направлению движения тока, м²;
 h – высота рабочей зоны печи, м.

Учитывая, что суммарное значение силы тока I в любом сечении слоя остается неизменным, распределение мощности источников теплоты при резистивном нагреве имеет вид

$$dN = I^2 \frac{\rho}{2\pi h} \frac{dr}{r}.$$

Моделирование процесса нагрева кипящего слоя, основанное на решении одномерной задачи теплопроводности для полого цилиндра с внутренними источниками теплоты при адиабатных

граничных условиях на его поверхностях, позволило оценить величину перепада температур по радиусу нагреваемого слоя и распределение температуры при установившемся режиме работы печи. В расчетах использован метод элементарных тепловых балансов и метод итераций.

Изменение величины удельного электросопротивления от температуры на первом этапе не учитывалось и принималось постоянным по сечению и равным $\rho=0,048$ Ом·м. Для учета теплопереноса в псевдооживленном слое использована

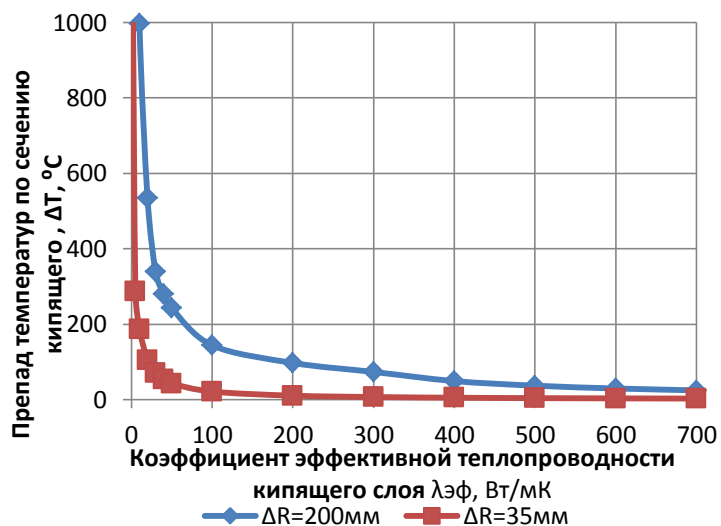


Рис. 4 Зависимость перепада температур по сечению кипящего слоя от величины

величины эффективной теплопроводности слоя $\lambda_{эф}$, определяемая исходя из равенства коэффициента диффузии и коэффициента температуропроводности кипящего слоя [10].

Значение $\lambda_{эф}$ варьировалось в расчетах от 0,3 Вт/мК до 700 Вт/мК. Верхнее значение $\lambda_{эф}$ соответствовало оценкам этой величины, приведенным в [10]. Значительная величина коэффициента эффективной теплопроводности псевдооживленного слоя как в вертикальном так и в горизонтальном направлении предопределяется интенсивной циркуляцией материала в виде пакетов частиц, характерных для развитых режимов псевдооживления с порозностью слоя равной 0,5-0,6.

Минимальное значение исследованного диапазона коэффициента эффективной теплопроводности характерно для плотного слоя зернистого материала, которая определяется величиной теплопроводности газонаполненных зазоров между частицами.

Металлургическая и горнорудная[®] ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Результаты расчетов (рис.4) показали, что перепад температур по сечению слоя определяется величиной эффективной теплопроводности и геометрическими размерами псевдооживленного слоя (расстоянием между электродами).

Так при отсутствии циркуляции в слое (режим потери устойчивости плотного слоя) перепад температур достигал 2000-3000°C, что исключает стабилизацию процесса термической обработки. При увеличении коэффициента эффективной теплопроводности до 50-100Вт/мК величина перепада температур снижалась до $\Delta T = 50 - 200$ °C при расстоянии между электродами $\Delta R = 35-200$ мм соответственно. Дальнейшее увеличение теплопроводности слоя приводит к плавному снижению перепада температур до 4-25 °C. Таким образом, реализация процесса высокотемпературной обработки углеродных материалов в электротермическом кипящем слое в условиях радиального направления тока возможна при условии развитого режима псевдооживления. Именно процесс перемешивания материала определяет выбор параметров подачи оживающего газа.

Таблица 2. Тепловой баланс печи с электротермическим кипящим слоем производительностью 1 т/ч.

Приходные статьи			Расходные статьи		
Название	кВт	%	Название	кВт	%
Теплота сырья	12	0,7	Теплота готового продукта	156 3	91
Теплота азота	0	0,0	Теплота отходящих газов	3	0,1
Электроэнергия	170 6	99, 3	Теплота уноса	78	4,6
			Водяное охлаждение	74	4,3
Итого	171 8	100		171 8	10 0

Расчеты материального и теплового баланса печей с электротермическим кипящим слоем (таблица 2) показали, что удельные затраты электроэнергии высокотемпературной обработки углеродного

материала в печи производительностью 1 т/час составляют 1500-1700 кВтч/т готовой продукции.

При этом затраты электроэнергии связаны в основном с уносом теплоты готовым продуктом, удаляемым из печи (более 90% потребленной энергии). Т.е., утилизация теплоты готового продукта является основным направлением совершенствования тепловой работы печей с электротермическим кипящим слоем.

Выводы

Основными направлениями совершенствования эффективности работы печей высокотемпературной обработки углеродных материалов для нужд металлургии является повышение температуры обработки до 2500-2700°C и снижение энергозатрат.

Существующие печи с т.н. плотным слоем обеспечивают обработку сырья до температуры 2000°C с удельными энергозатратами 1380-500кВтч/т.

Повышение температуры обработки может быть реализовано по двухстадийной технологии, предложенной АТЕС: первая стадия - обработка исходного сырья при температуре 900-1200°C; вторая стадия - высокотемпературная обработка (2500-2700°C) в печи с электротермическим кипящим слоем. Удельные затраты электроэнергии составляют на первой стадии 200-900 кВтч/т и на второй стадии - 1500-1700кВтч/т. Основным направлением совершенствования печей для реализации двухстадийной технологии является использование теплоты отходящего готового продукта для предварительного нагрева поступающего в печь сырья. Результаты расчетов показывают, что реализация этого направления позволит снизить энергозатраты на первой стадии до 200 кВтч/т.

Выбор режимов работы печей с электротермическим кипящим слоем и коаксиальным расположением электродов определяется характеристиками исходного и термически обработанного материала, гидродинамическим режимом кипящего слоя в рабочем пространстве печи, которые влияют на выбор основных геометрических и технологических параметров печи: расход оживающего газа, силу тока и напряжение на электродах.

Металлургическая и горнорудная[®] ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Библиографический список

1. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства./ В.П.Твердохлебов, С.А. Храменко, Ф.А. Бурюкин, И.В. Павлов, С.Е. Прошкие /Журнал Сибирского федерального университета. Серия Химия.№4,2010, с369-386
2. Гасик М.М., Гасик М.И. и др. Комплексная модель прокаливания антрацита в электрокальцинаторе // Электрометаллургия, № 2, 2007.
3. Управление процессом прокаливания антрацита по измеряемой величине напряжения электрокальцинатора/М.И.Гасик, Е.И.Цибуля, А.В. Безуглый,А.Г.Гриншпунт,С.В.Кутузов,В.В.Буряк//Металлургическая и горнорудная промышленность.-2009.-№5-С.31-35.
4. Исследование влияния межэлектродного расстояния на распределение мощности в антрацитовой загрузке электрокальцинатора и качество термоантрацита/С.В.Кутузов,О.Ю.Уразлина,В.В.Деркач,М.И.Гасик,А.Г.Гриншпунт,А.В.Безуглый,Е.И.Цибуля//Металлургическая и горнорудная промышленность.-2006.-№5.-С.25-29,
5. Петров Б.Ф. Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита.-К.-«Экотехнология», 2006, 144с
6. Печи для производства высокочистых углеродных материалов/ Губинский М.В., Федоров С.С., Ливитан Н.В., Барсуков И.В., Гогоци А.Г.,Бродниковский Н.П./ Сборник докладов международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» 18-21 сентября 2012, Екатеринбург УрФУ, с79-83.
7. Забродский С. С. Высокотемпературные установки с псевдо оживленным слоем. - М. : Энергия, 1971. - 328 с.
8. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое.- Минск.- Наука и техника, 1973.-173с.
9. Локальная проводимость кипящего слоя, состоящего из электропроводных частиц /А. И. Малиновский, О. С. Рабинович, В. А.Бородуля, А. Ж. Гребеньков, А.М.Сидорович// Инженерно-физический журнал. - 2012. - Т. 85, № 2. - С. 239-245
10. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Ленинград – «Химия».- 1981, 296с

Авторы выражают благодарность за поддержку в рамках программы GIPP Министерству энергетики США (контракт BNL-T2-0372-UA) и сотрудникам Украинского научно-технологического центра Дудко Н.А. и Четвертак Ю.Б. за помощь в реализации партнерского проекта P482. Выражаем также свою благодарность коллегам из Конструкторского бюро «Южное» Луценко В.И., Тырыгину Я.А., Никитенко К.А., и Писаренко В.Ю., принимающих участие в выполнении проекта.