

сопротивления термоантрацита, так же как и его внутреннего удельного электрического сопротивления [3], является нагрев угля.

Плохие электроконтактные свойства термоантрацита используются во благо в созданных более четверти века тому назад шахтных электропечах для отжига антрацита. В этих печах термоантрацит служит активным электрическим сопротивлением и нагрев угольной шихты осуществляется за счет теплоты, выделяемой в электроконтактах термоантрацита [8].

Если в свете высказанных положений об электроконтактных свойствах термоантрацита рассмотреть поведение угля в шахтной электропечи-кальцинаторе в части его контактного сопротивления, то можно прийти к выводу, что снижение последнего следует ожидать на колошнике печи, где антрацитовое сырье нагревается горячими колошниковыми газами, выходящими из печи. В этом месте шахты печи при нагреве антрацита падает не только внутреннее удельное электросопротивление угля, которое, кстати говоря, убывает очень быстро, по экспоненте, но и контактное сопротивление в результате понижения значения  $R_{\text{п}}$  вследствие удаления адсорбированной влаги. Когда при нагреве антрацита горячими газами сухой перегонки угля его

$R_{\text{п}}$  снизится практически до нуля,  $R_{\text{к}}$  будет определяться только значением  $R_{\text{с}}$ , а оно, как видно из сказанного выше, слабо зависит от контактного давления и, следовательно, будет изменяться незначительно по мере опускания угля по направлению от верхнего к нижнему электроду печи.

1. Есин О. А., Гельд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. — Свердловск: Metallurgizdat, 1962. — Ч. 1. — 671 с.
2. Махорин К. Е. Использование активированных углей в водоподготовке // Химия и технология воды. — 1998. — XX, № 1. — С. 53–57.
3. Быковец В. В., Лакомский В. И. Удельное электрическое сопротивление термоантрацита // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 49–51.
4. Sorlie M., Oye H. Cathodes in aluminium electrolysis. — Duesseldorf: Aluminium, 1998. — 320 p.
5. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. — 464 с.
6. Займовский А. С., Усов В. В. Металлы и сплавы в электротехнике. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. — 568 с.
7. Филалов А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. — М.: Аспект пресс, 1997. — 718 с.
8. Лакомский В. И., Быковец В. В. К вопросу о контактном нагреве термоантрацита в электрокальцинаторе // Цветные металлы. — 2004. — № 1. — С. 52–54.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 23.01.2004

УДК 669.187.004.18

## ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМОАНТРАЦИТОВЫХ КОНТАКТОВ

В. И. Лакомский

Впервые получены вольт-амперные характеристики контактов между зернами термоантрацита в условиях импульсного и стационарного электропитания последних. Показано, что в изотермических условиях измерений ВАХ термоантрацитовых контактов прямолинейна и проходит через начало координат.

Volt-ampere characteristics of contacts between grains of thermoanthracite under the conditions of pulsed and stationary electric supply of the latter were obtained for the first time. It is shown that VAC of thermoanthracite contacts in the isothermal conditions of measurements is straight-linear and passes through the beginning of coordinates.

**Ключевые слова:** термоантрацит; электрический контакт; электронагрев; вольт-амперная характеристика контакта; влияние давления на контактное сопротивление

В электрических шахтных печах для производства термоантрацита загруженная масса угля вначале нагревается путем конвективного нагрева отходящими из печи газами сухой перегонки угля. При нагреве угля его электропроводность экспоненциально растет. Затем, когда электропроводность угля достигнет определенного значения, а слой угля опустится в зону действия электрического поля печи, зерна угля становятся элементами электрической

цепи внутри печи и электрический ток по этим элементарным проводникам перетекает с одного электрода печи в другой.

В дальнейшем нагрев угля осуществляется путем электроконтактного нагрева тех зерен угля, которые участвуют в переносе электрических зарядов с одного электрода печи на другой, и путем передачи теплоты от центральной зоны шахты, нагретой электрическим током, к ее периферии [1]. Другими словами, высокотемпературный электроотжиг антрацита в печах-кальцинаторах осуществляется за счет джоулева тепла, выделяющегося в электрических контактах угля.

Для анализа процессов выделения тепловой энергии в электрических контактах термоантрацит–термоантрацит, кроме прочих контактных характеристик и электрических свойств самого термоантрацита [2–4], необходимо знать вольт-амперные характеристики (ВАХ) указанных контактов.

Прежде чем заняться определением ВАХ контактов, оценим, в каком диапазоне тока и напряжения работают элементарные термоантрацитовые контакты в угольной шахте промышленного электрокальциниатора ИЭТ-10-УХЛ-4. Несмотря на то, что оценка будет выполнена грубо, без учета неравномерности распределения плотности тока по поперечному сечению шахты электрокальциниатора, она даст возможность представить себе порядок значений искомых величин.

Итак, указанный выше кальциниатор при отжиге «сырого» антрацита обычно работает на токах 12... 15 кА. Падение напряжения между электродами печи, отстоящими друг от друга на расстоянии 2 м, не превышает 60 В. Внутренний диаметр шахты кальциниатора по футеровке составляет 1950 мм. Фракционный состав угольной шихты поддерживается на уровне 8... 25 мм.

Теперь, определив средний арифметический диаметр зерна угольной шихты и рассчитав площадь поперечного сечения шахты печи, можно найти статистическое количество зерен, расположенных в одном слое указанного сечения печи. Оно составляет 10955 штук. Приняв, что каждое зерно термоантрацита имеет один точечный контакт с соседним зерном в направлении прохождения электрического тока от электрода к электроду, можно, зная общий ток печи, оценить значение тока, приходящееся на элементарный контакт. Оно составляет от  $12000/10955 \approx 1,1$  до  $15000/10955 \approx 1,4$  А. Для оценки падения электрического напряжения на каждом элементарном контакте подобным образом найдем, что искомое значение составляет  $\approx 0,5$  В.

Действительно, в результате неравномерного распределения плотности тока по поперечному сечению шахты электрокальциниатора в центральной зоне печи через элементарные контакты термоантрацита будут проходить токи, большие, чем расчетные, а в периферийных зонах — меньшие. Так же изменятся и значения контактных электронапряжений. Разумеется, чем большее механическое воздействие на контакт оказывают вышележащие слои угля, тем ниже будет контактное напряжение и выше значение тока.

Подобным путем найдем также, что на уровне нижнего торца верхнего электрода печи каждый элементарный контакт между зернами термоантрацита при передаче электрической энергии находится под давлением вышележащих слоев угля  $\approx 135$  г, а на уровне верхнего торца нижнего электрода — 680 г.

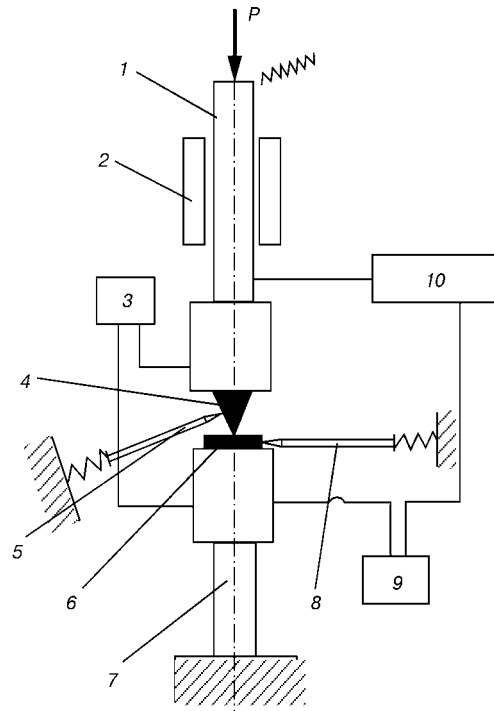


Рис. 1. Схема установки для определения ВАХ электрических контактов (обозначения см. в тексте)

Таким образом, электрический диапазон, в котором следует изучать ВАХ термоантрацитовых контактов, очевидно, будет лежать в диапазоне от десятых долей до нескольких вольт, а ток — в пределах от нескольких до полудесятка ампер.

Насколько нам удалось установить при анализе доступной литературы, ВАХ контактов между зернами термоантрацита, к сожалению, ранее не изучались. Известна только одна работа ученых Шахтинского филиала Новочеркасского политехнического института [5], в которой исследовалась ВАХ самого антрацита как материала. Те же исследователи [6] изучили ВАХ электрического контакта антрацит–никель (подчеркнем, антрацита, а не термоантрацита). Они установили, что в изотермических условиях при импульсном, чтобы избежать нагрева контакта за время его испытания, питании антрацитового образца ВАХ антрацита имеет линейный характер. Если же испытания выполнять в условиях непрерывного режима электропитания, когда прохождение тока приводит к нагреву антрацита, его ВАХ с ростом тока искривляется в сторону оси тока. Авторы работ [5, 6] отметили, что падение напряжения на контактах антрацит–металл приводит к весьма значительному изменению электрического напряжения на исследуемых образцах. К сожалению, в этих работах нет ни слова о ВАХ термоантрацита и его контактов. Тем не менее, эти работы полезны нам, т. к. позволяют аргументированно утверждать, что при изотермических условиях исследования на значительно больших токах термоантрацитовые контакты имеют прямолинейные ВАХ, поскольку электропроводность термоантрацита на несколько порядков выше, чем сырья, из которого его получают.

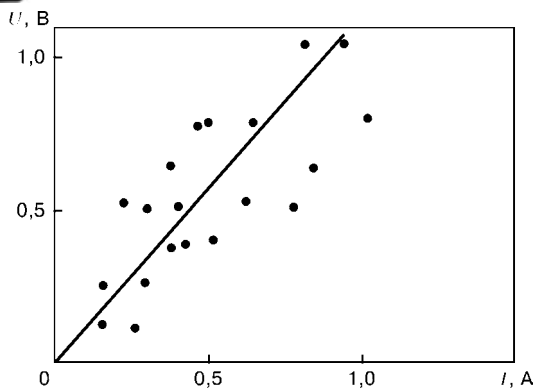


Рис. 2. Типичная ВАХ термоантрацитового контакта при комнатной температуре и нагрузке 110 г

В настоящей работе ВАХ снимали на простой установке, схема которой представлена на рис. 1. На листе электроизоляционного материала  $250 \times 200$  мм толщиной 5 мм, заделанного в жесткую металлическую рамку, укрепляли два медных штока 1 (верхний) и 7 (нижний), причем, нижний шток крепили к листу неподвижно, а верхний перемещался в сальнике 2 по вертикальной оси. Оба медных штока имели в головной части глухое отверстие, в которое на углеродной пасте МУП вклеивали по одному зерну термоантрацита. В верхний шток вклеивали зерно 4 конической формы, в нижний — плоское зерно 6. После вклеивания шток с зерном термоантрацита подвергался низкотемпературному коксуванию. Электрическое сопротивление перехода медный шток–зерно термоантрацита в результате этого оказалось меньше 1 Ом. Падение напряжения на контактах между зернами термоантрацита измеряли с помощью подпружиненных потенциометрических щупов 5 и 8.

Установка работала следующим образом: на замкнутый контакт между образцами термоантрацита подавали электрическую нагрузку от специального источника тока 10. Изменения значений напряжения и тока на изучаемом контакте фиксировали соответственно приборы 3 и 9, причем, показания падения напряжения на зернах термоантрацита через аналого-цифровой преобразователь поступали в компьютер для дальнейшей обработки. На этой же установке определяли ВАХ контакта при различных механических нагрузках, изменяемых с помощью массы  $P$ .

Уже первые опыты показали, что как и в случае монолитного антрацита [5], ВАХ единичного термоантрацитового контакта при пульсирующем ре-

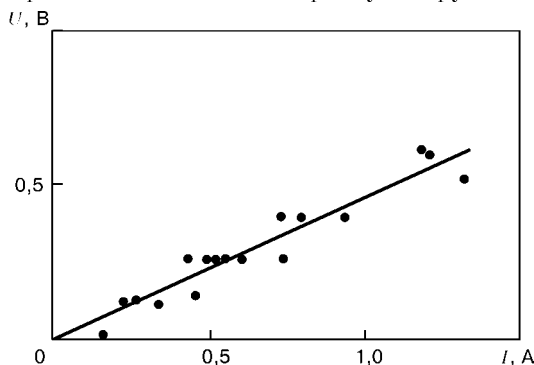


Рис. 3. ВАХ термоантрацитового контакта при комнатной температуре и нагрузке 540 г

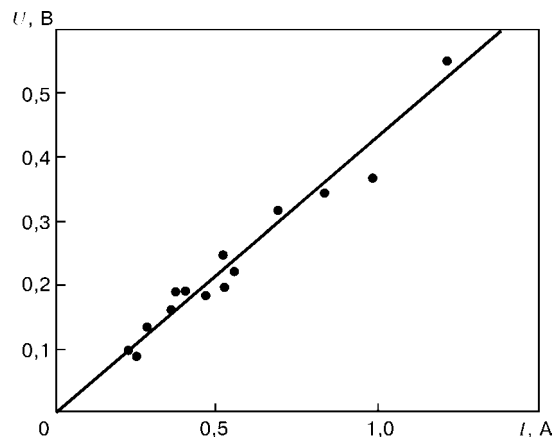


Рис. 4. ВАХ термоантрацитового контакта при нагрузке 110 г после предварительной нагрузки 540 г

жиге подачи тока на контакт представляет собой прямую линию, проходящую через начало декартовых координат. Типичная ВАХ термоантрацитового контакта при механической нагрузке 110 г и комнатной температуре, показана на рис. 2. В этом случае сопротивление «свежесобранного» контакта составляет 1,16 Ом. С увеличением механической нагрузки, как и следовало ожидать, вид ВАХ не изменяется, а контактное сопротивление снижается. Так, при давлении 540 г и той же температуре сопротивление понизилось до 0,46 Ом (рис. 3). Если снять повышенную механическую нагрузку и вернуться к прежней (110 г), практически сохранится то значение контактного сопротивления, которое наблюдалось в условиях 540 г. Это хорошо видно на рис. 4. Здесь расчетное контактное сопротивление составляет 0,44 Ом.

Анализ представленных рисунков показывает, что, во-первых, при испытании такого хрупкого материала, как термоантрацит, совершенно исключается явление гистерезиса  $R_{кон}$  и, во-вторых, повышенная нагрузка на контакт термоантрацитовых частиц уплотняет контактные поверхности, делает контакт более совершенным, о чем свидетельствует намного лучшая воспроизводимость отдельных измерений, выполненных после предварительного нагружения (ср. рис. 2 и 4).

Отмеченное явление, на наш взгляд, полезно для практики электронагрева дробленого термоантрацита перед приготвлением смеси шихты подовых блоков алюминиевых электролизеров. Достаточно слой дробленого термоантрацита в электроподогревателе прикатать с усилием, чтобы слой угля стал плотнее, а, главное, чтобы его нагрев электрическим током был равномерным по всей толщине слоя.

При статическом режиме питания контакта его ВАХ искривляется в сторону оси тока. Искривление ВАХ, как известно, связано с джоулевым нагревом контактного материала вблизи  $\alpha$ -пятна контакта [4], поэтому степень искривления определяется температурной зависимостью удельного электросопротивления. Так как сопротивление термоантрацита зависит от температуры линейно [5], то рассматриваемая ВАХ искривляется менее интенсивно, чем ВАХ антрацита, для которого та же зависимость имеет экспоненциальный характер.

Рассмотрим теперь в общем плане ВАХ электрических контактов тех материалов, которые обла-

дают положительным и отрицательным температурным коэффициентом удельного сопротивления  $\beta$ . Гипотетическое поведение различных ВАХ представлено на рис. 5. Здесь позицией 1 отмечена ВАХ контакта при импульсном режиме его питания, когда за весьма короткое время протекания тока через контакт материал последнего не успевает нагреться. Разумеется, в этом случае ВАХ будет представлена прямой линией, проходящей через начало координат. Если же электрическое питание контакта осуществляется в статическом режиме, что чаще всего наблюдается на практике, то с ростом тока ВАХ контакта будет искривляться: для контактного материала с положительным значением  $\beta$  (это относится к металлам и практически ко всем металлическим сплавам) — в сторону оси напряжений (позиция 2), а для материала, обладающего отрицательным  $\beta$  (что относится к термоантрациту), — в сторону оси токов (позиция 3).

Поскольку термоантрацит характеризуется отрицательным значением температурного коэффициента удельного электрического сопротивления  $-(3...4) \cdot 10^{-4} \text{ T}^{-1}$  [3], то с ростом тока при нагреве материала контакта будет понижаться его контактное сопротивление и, следовательно, меньше будет падение напряжения на контакте. Чем выше ток, проходящий через контакт, тем выше температура нагрева контактного материала и ниже падение напряжения. Так как электрическая мощность, рассеиваемая на контакте, зависит от  $I^2$ , рост температуры контактного материала непременно будет опережать рост тока, проходящего через контакт. Очевидно, что бесконечно так продолжаться не может даже в условиях контролируемой восстановительной атмосферы. Для металлических контактов повышение температуры в конечном счете приводит к оплавлению контактных поверхностей и разрушению контакта. Для термоантрацитового контакта, несмотря на весьма высокую температуру плавления угля, также должен наступить момент вырождения. Возможно, это связано с сублимацией углерода. На

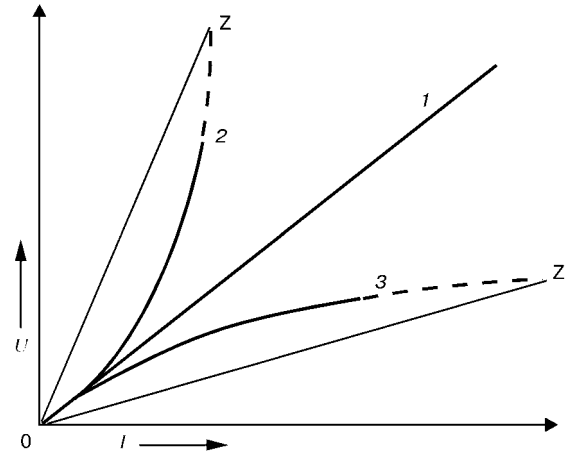


Рис. 5. ВАХ электрических контактов проводников при импульсном (1) и статическом режиме питания с отрицательным (2) и положительным (3) температурным коэффициентом удельного сопротивления  $\beta$

рис. 5 разрушение контакта показано тонкой прямой линией, обращенной в нуль.

1. Лакомский В. И., Быковец В. В. К вопросу о контактном нагреве термоантрацита в электрокальцинаторе // Цветные металлы. — 2004. — № 1. — С. 52–54.
2. Лакомский В. И. Математическая модель расчета удельного электрического сопротивления зернистого термоантрацита в зависимости от его фракционного состава // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2003. — № 3. — С. 48–51.
3. Быковец В. В., Лакомский В. И. Удельное электросопротивление термоантрацита // Там же. — 2003. — № 4. — С. 49–51.
4. Лакомский В. И., Быковец В. В., Кириленко В. П. Удельное электросопротивление термоантрацита в тонком слое // Там же. — 2004. — № 1. — С. 47–49.
5. Окорочков А. И., Павлинов А. Б., Посыльный В. Я. О нелинейности вольт-амперных характеристик антрацитов // Химия твердого топлива. — 1980. — № 3. — С. 52–54.
6. Окорочков А. И., Павлинов А. Б., Посыльный В. Я. Свойства контактов металл-антрацит при большой плотности тока // Там же. — 1983. — № 4. — С. 103–105.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 09.03.2004

## Международный симпозиум по обработке жидких металлов и литью

США, Нью-Мехико, г. Санта-Фе

18–21 сентября 2005 г.

### Организатор

Американское общество по материалам (ASM International)

### Тематика

- Первичная и вторичная обработка расплавов, включая ЭШП, ЭЛП, ВДП, ВИП и др.
- Измерение физических свойств жидких металлов
- Измерение физических свойств жидких металлов в контролируемой атмосфере, измерение тепловых потоков и изменений химсостава в процессах
- Рафинирование, испарение и реакции газов с металлами
- Литье, затвердевание жидких металлов в слитки и фасонное литье
- Моделирование металлургических процессов, включая тепломассоперенос
- Реакции керамики, шлака и тугоплавких материалов с жидким металлом
- Теоретические основы реакций, включающие жидкие металлы в производственных процессах
- Прямая формовка деталей из жидкого металла

Тел.: (44) 207 594 6801. Факс: (44) 440 338 4634. E-mail: beth.abruzzo@asminternational.org