



УДК 669.187.004.18

## КОНТАКТНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ДРОБЛЕННОГО ТЕРМОАНТРАЦИТА

В. И. Лакомский

Показано, как можно, пользуясь представлением Р. Хольма о реальных контактных пятнах двух соприкасающихся твердых тел, получить аналитическую зависимость коэффициента внешней теплопроводности сыпучего материала от внутренней его теплопроводности и фракционного состава и рассчитать по известным значениям удельного электрического сопротивления значение коэффициента внешней теплопроводности.

The feasibility is shown for use of R.Holm's conception about the real contact spots of two contacting solid bodies to obtain the analytical dependence of a coefficient of external heat conductivity of bulk material on internal its heat conductivity and fractional composition and to calculate the value of a coefficient of heat conductivity using the known values of specific electric resistance.

**Ключевые слова:** твердое тело; сыпучий материал; фракционный состав; реальное контактное пятно; внутренняя и внешняя теплопроводность

В электродном производстве для изготовления электродов ферросплавных печей и алюминиевых электролизеров в качестве одного из компонентов шихтовой смеси широко используется такой сырьевой материал, как термоантрацит. Получают его путем прокалики обычного антрацита без доступа воздуха при высоких температурах в пламенных или электрических печах. Термоантрацит из электропечи отличается особо высоким качеством.

Электрические печи эксплуатируются уже более четверти века, но, несмотря на это, до сих пор не удается выполнить более или менее корректный тепловой расчет процессов нагрева угля из-за отсутствия данных о теплопроводности дисперсного термоантрацита и особенно ее зависимости от фракционного состава угля и его температуры. На наш взгляд, это объясняется сложностью и громоздкостью экспериментов по определению тепловых параметров реальных дисперсных смесей, к тому же достоверность получаемых таким путем значений коэффициентов теплопроводности не столь высока как, скажем, при определении электропроводности термоантрацита [1].

В физическом металловедении на основании того факта, что в твердых металлах перенос тепловой и электрической энергии осуществляется по одной и тому же механизму, а именно — потоком электронного газа в элементарной решетке, твердо уста-

новлено, что для всех металлов отношение теплопроводности  $\lambda$  к электропроводности  $\sigma$  и температуре  $T$  ( $\lambda/\sigma T$ ) есть величина постоянная. Она получила название числа или функции Лоренца. Пользуясь числом Лоренца, можно легко, не прибегая к прямым экспериментам, определить значение  $\lambda$  по известному значению  $\sigma$  при определенной температуре [2] до точки плавления металла и даже при небольшом перегреве металлического расплава.

Проведенные измерения [3] показали, что термоантрацит как монолитный материал отличается хорошей электропроводностью. Например, удельное электрическое сопротивление  $\rho$  термоантрацита, произведенного на заводе ОАО «Украинский графит» из угля Центральной обогатительной фабрики «Обуховская» объединения «Гуковантрацит», составляет от  $74,8 \pm 2,1$  до  $134,1 \pm 0,4$  мкОм·м. Температурный коэффициент электросопротивления термоантрацита в противоположность металлам отрицательный и составляет  $3 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$  [3]. Из монографии [4] и работ [5, 6] известно, что перенос тепловой энергии в термоантраците и графитированном материале осуществляется также электронным потоком.

Используя имеющиеся экспериментальные данные об удельном электрическом сопротивлении и теплопроводности различных углеродных материалов, нам удалось показать, что функцию Лоренца вполне можно использовать для определения теплопроводности термоантрацита по его электропро-

© В. И. ЛАКОМСКИЙ, 2004

водности [7]. Правда, число Лоренца для термоантрацита, как и для любого графитированного материала, незначительно зависит от температуры и составляет  $0,00043 T^{-1,05}$ .

Рассмотрим явление теплопроводности в твердом теле, в частности в термоантраците, используя терминологию, принятую в физическом металловедении. Если в пределах одного и того же твердого тела возникнет разность температур, то теплота самопроизвольно станет перетекать от нагретых участков тела к более холодным. Такое явление объясняется присущим телу свойством, называемым теплопроводностью. Когда речь идет о передаче теплоты в пределах монолитного твердого тела, то это свойство принято называть внутренней теплопроводностью и оценивать коэффициентом теплопроводности  $\lambda_0$ , размерность которого Вт/(м·К). Если же твердое тело измельчить, то его теплопроводность непременно изменится. Как показывают многочисленные исследования [5, 6], теплопроводность сыпучего материала  $\lambda_{см}$  всегда существенно ниже теплопроводности монолита. Этот параметр имеет ту же размерность, что и монолит и называется внешней теплопроводностью [1]. Эти же понятия следует распространить и на удельное электрическое сопротивление — внутреннее  $\rho_0$  и внешнее  $\rho_{см}$ .

Рассмотрим изменение внешней теплопроводности сыпучего материала по мере его измельчения, причем будем учитывать только контактную теплопроводность, ответственную за перенос теплоты через места касания отдельных зерен твердого материала между собой. Попытаемся найти аналитическую зависимость этой величины от фракционного состава сыпучего материала и коэффициента его внутренней теплопроводности.

Поток теплоты через твердое тело в дисперсном состоянии осуществляется тремя путями. Прежде всего, теплота передается от одного куска материала к другому через площадь их непосредственного контакта. Если между кусками твердого материала есть пространство, заполненное газом и достаточное для образования макротокков газа в пределах этого пространства, то перенос теплоты может происходить путем конвекции через газовую фазу, и наконец, при высокой температуре, когда отдельные фрагменты кускового материала сильно нагреты, тепловая энергия передается внутри слоя сыпучего материала радиационным путем. Строго говоря, есть еще один путь теплопроводности от одного куска материала к другому — молекулярный перенос теплоты через весьма тонкую газовую прослойку между контактирующими кусками твердого тела. Однако вклад этого вида теплопереноса в общий тепловой поток в кусковом материале настолько мал, что им обычно пренебрегают.

При невысоких температурах, несмотря на то, что внешняя теплопроводность сыпучих материалов осуществляется как путем кондуктивной теплопередачи, так и путем конвекции газа в порах между зернами, в мелкозернистом материале теплота пе-

реносится в основном по контактному механизму теплопередачи.

Анализ существующей литературы показывает, что исследование зависимости теплопроводности измельченного термоантрацита от его фракционного состава, насколько известно, до сих пор не проводилось, несмотря на острую необходимость в этих данных для расчетов тепловых печей — кальцинаторов антрацита.

В работе [8] удалось, используя представления Рогнара Хольма [9] о контактном переносе электрических зарядов из одного твердого тела в другое, построить математическую модель и получить аналитическую зависимость электропроводности дисперсного материала от степени его измельчения. При этом исходили из предположения, что контактное электрическое сопротивление между частицами смеси намного превышает сопротивление их объема и поэтому последним сопротивлением можно пренебречь. Было показано, что удельное электросопротивление сыпучего материала связано с таким же материалом до его измельчения и размером отдельной фракции дисперсной массы следующей весьма простой зависимостью:

$$\rho_{см} = \rho_0 \frac{r}{a}, \quad (1)$$

где  $r$  — радиус определенной фракции твердого тела;  $a$  — приведенный радиус реального контактного пятна по Р. Хольму. Широкая экспериментальная проверка этого уравнения показала достоверность полученной зависимости.

Поскольку, как было сказано выше, в твердом материале перенос электрической и тепловой энергии осуществляется по одному и тому же механизму, мы решили воспользоваться методом аналогии и формализовать эти явления путем замены электрического сопротивления сопротивлением тепловым. При этом за внутреннее тепловое сопротивление приняли величину, обратную теплопроводности  $1/\lambda_0$ . Эта величина может быть также трансформирована в понятие «теплого сопротивления сыпучего материала»  $1/\lambda_{см}$ . Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{1}{\lambda_{см}} = \frac{1}{\lambda_0} \frac{r}{a}. \quad (2)$$

Если теперь преобразовать уравнение (2), то получим простое выражение, в котором использована привычная для нас величина  $\lambda$

$$\lambda_{см} = \lambda_0 \frac{a}{r}. \quad (3)$$

Из приведенной формулы следует, что внешняя теплопроводность диспергированного твердого материала  $\lambda_{см}$  находится в прямой зависимости от внутренней теплопроводности самого материала  $\lambda_0$ , размеров реального контактного пятна между зернами сыпучего материала  $a$  и в обратной зависимости от фракции угля  $r$ . Чем мельче подроблен твер-

**Таблица 1**

Дано		Рассчитано					
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Средний арифметический радиус фракций, мм	Отношение $\lambda_{сн}/\lambda_0$	Реальный радиус контактного пятна, мм	Площадь контактного пятна, мм <sup>2</sup>	Число зерен на 1 см <sup>2</sup>	Усилие на одно зерно, кг	Твердость $HВ$ , МПа
0,295	Монолит	—	—	—	—	—	—
0,175	0,1125	0,59	0,066	0,0137	1975	0,0506	37
0,155	0,3625	0,53	0,192	0,1157	190	0,5263	45
0,125	1,5	0,42	0,630	1,2463	11	9,021	72

дый материал, тем выше теплопроводность его сыпучей модификации.

Судя по формуле (3), с увеличением размера фракции сыпучей смеси ее теплопроводность должна падать. Качественно такая зависимость подтверждается многочисленными наблюдениями [4–6].

Из формулы также следует, что рост размеров реального контакта между зернами сыпучего материала должен приводить к увеличению коэффициента теплопроводности. Это отвечает логике событий при переходе тепловой энергии через границу раздела двух фрагментов твердого материала. Как и в предыдущем случае, качественно такая картина подтверждается практикой работы с сыпучими смесями — чем больше уплотнена смесь, чем выше ее насыпная масса, тем лучше сыпучая смесь проводит тепловую энергию [5, 6].

Что же касается количественной проверки уравнения (3), то здесь надо сказать следующее. Анализ литературы показал, что вопрос влияния степени измельчения твердого материала на кондуктивную теплопроводность освещен очень слабо. Особенно это касается антрацита и продукта его переработки — термоантрацита. Имеются только отдельные сведения о результатах измерений теплопроводности различных марок углей, но без связи со степенью их дробления.

В работах [5, 6], где, судя по их названию, должна быть информация о теплопроводности угля различной степени измельчения, есть только экспериментальные данные о коэффициенте теплопроводности угля неизвестного фракционного состава, но различной насыпной массы, изменяемой путем прессования. Так, коэффициент теплопроводности угля удельной насыпной массой 600 г/л составлял 0,137, а того же угля, насыпная масса которого была доведена путем прессования до 950 г/л, имел более высокое значение — 0,176 Вт/(м·К). Если предположить, что контактная теплопроводность в рассматриваемом угле преобладает над другими видами переноса теплоты, то при уплотнении сыпучей массы число точек реального контакта между зернами угля, так же как и размер контактных пятен между ними, увеличится и это непременно приведет к росту теплопроводности угля. С этой точки зрения приведенные данные качественно подтверждают справедливость формулы (3). При этом, однако, остается неизвестным, происходило ли в результате

механического уплотнения угля его дробление, связанное с раздавливанием отдельных зерен угля.

Только в одной работе [10] нам удалось найти результаты прямых экспериментов. И что особенно важно, в ней изучалась зависимость контактной теплопередачи от фракционного состава антрацита. Были получены значения коэффициента теплопроводности для монолита и трех фракционных составов: 0... 0,45; 0,45... 1,0; 1,0... 5,0 мм. Дисперсный материал для проведения измерений прессовали в брикеты под давлением 10 МПа. Коэффициент теплопроводности монолита составил 0,343 Вт/(м·К), а трех фракционных составов соответственно 0,203; 0,180 и 0,145 Вт/(м·К) (эти данные взяты нами из графика, приведенного в работе [10], и пересчитаны в единицы системы СИ). Теплопроводность сыпучих смесей более крупных фракций в рассматриваемой работе не изучалась в связи с проявлением в массе угля с фракциями выше 5 мм заметной конвективной теплопередачи между отдельными зернами.

Из приведенных данных видно, что самая высокая теплопроводность, как и следовало ожидать, у монолита. Что же касается дробленого антрацита, то чем крупнее фракция, тем теплопроводность ее ниже. Это же следует и из уравнения (3).

Вводя понятие о пятне реального контакта соприкасающихся двух твердых тел, Р. Хольм [9] полагал, что радиус реального единичного пятна контакта весьма и весьма мал и составляет значения микронного порядка, что несравнимо с размером даже самых мелких фракций угля. Надо сказать, что в формулах (1) и (3) величина  $a$  представляет собой сумму всех пятен реального контакта на сопряженных поверхностях двух зерен антрацита. Тем не менее, величина  $a$  все равно меньше  $r$ , в чем можно легко убедиться, сравнив значения внешней и внутренней теплопроводности.

Используя экспериментальные данные работы [10], мы провели следующий анализ. Определили средний арифметический радиус зерен антрацита для каждой из трех смесей, затем по формуле (3) рассчитали значение  $a$  для этих смесей. Известно [11], что контактное пятно на хрупких материалах чаще всего принимает форму круга. Отсюда было легко определить площадь контактного пятна. Затем, исходя из среднего радиуса зерен антрацита, рассчитали количество зерен, размещающихся на площади 1 см<sup>2</sup> при условии их рядовой укладки. Далее рассчитали усилие прижатия друг к другу



Таблица 2

Температура, К	Внутреннее удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	Внутренняя теплопроводность, Вт/(м·К)
293	104,5	3,1
773	89,8	3,4
973	83,6	3,6
1273	73,1	4,1
1773	58,5	5,1
2273	42,8	6,9
2773	27,2	10,2

зерен антрацита при давлении 10 МПа. Наконец, зная силу прижатия и площадь соприкосновения зерен угля, из этой же работы определили твердость по Бринеллю изучаемого угля. Результаты расчета представлены в табл. 1. К сказанному следует добавить, что в таблице также приведено отношение  $\lambda_{см}/\lambda_0$ , необходимое для расчета значения  $a$  по формуле (3).

Полученное в результате расчетов среднее арифметическое значение твердости антрацита по Бринеллю всех трех фракционных составов оказалось равным  $51 \pm 14$  МПа. Это вполне реальный показатель для необожженного антрацита [4–6]. Что же касается недостаточно хорошей воспроизводимости результатов расчета, то надо помнить, что антрацит представляет собой весьма неоднородный материал. Его физические свойства зависят не только от месторождения, шахты добычи угля, но даже от лавы его залегания.

На наш взгляд, результаты расчета свидетельствуют об удовлетворительной точности выполненных автором работы [4] измерений коэффициентов теплопроводности и в то же время позволяют нам признать правильность представлений о процессе контактной передачи теплоты при выводе формулы (3).

Вернемся теперь к функции Лоренца. Зная экспериментальное значение  $\rho_0$  термоантрацита при определенной температуре, можно не только по формуле (1) рассчитать удельное электрическое сопротивление его сыпучей смеси, но и определить значение  $\lambda_0$  для компактного материала при той же температуре по значению числа Лоренца, а также вычислить значение  $\lambda_{см}$  для сыпучего материала по уравнению (3). Покажем это на примере. Для этого воспользуемся полученным нами ранее значением внутреннего удельного электрического сопротивления термоантрацита при комнатной температуре и его температурным коэффициентом [3]. В общем виде полученная температурная зависимость выглядит следующим образом:

$$\rho_T = 104,45 (1 - 0,0003\Delta T), \quad (4)$$

где 104,45 есть среднее арифметическое значение удельного электрического сопротивления при комнатной температуре;  $\Delta T$  — разница между экспе-

риментальной и комнатной температурами. Затем, пользуясь функцией Лоренца и рассчитанным значением  $\rho_T$ , определим внутреннюю теплопроводность термоантрацита  $\lambda_{T(0)}$  при выбранной температуре. Результаты расчета внутреннего удельного электрического сопротивления и внутренней теплопроводности термоантрацита приведены в табл. 2.

Используя данные таблицы, рассчитываем по уравнению (3) внешнюю теплопроводность при различных температурах для сыпучей смеси антрацита определенного фракционного состава. Для этого можно использовать экспериментальные данные о радиусе приведенного контактного пятна по Хольму, полученные в работе [12].

Такой путь определения теплопроводности дробленого термоантрацита различных фракций при различных температурах открывает возможность выполнения тепловых расчетов электрокальцинатора: определения тепловых потоков в шахте печи, кривых радиального распределения температур по горизонтам печи, тепловых потоков в стенке электрокальцинатора и многое другое.

На наш взгляд, изложенное выше решение вопроса о контактной теплопроводности твердых тел показывает, что использование представления Хольма о контактных явлениях твердых тел весьма плодотворно не только в теоретической электротехнике, но и в теории теплопередачи.

1. Лившиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.
2. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.
3. Быковец В. В., Лакомский В. И. Удельное электрическое сопротивление термоантрацита // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 49–51.
4. Шулепов С. В. Физика углеродистых материалов. — М.: Металлургия, 1972. — 254 с.
5. Азроскин А. А. Физические свойства угля. — М.: Металлургия, 1961. — 309 с.
6. Азроскин А. А. Тепловые и электрические свойства углей. — М.: Металлургия, 1959. — 266 с.
7. Лакомский В. И. Постоянная Лоренца углеродного материала катодных блоков алюминиевого электролизера // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 3. — С. 57–62.
8. Лакомский В. И. Математическая модель расчета удельного электрического сопротивления зернистого термоантрацита в зависимости от его фракционного состава // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 3. — С. 48–51.
9. Хольм Р. Электрические контакты. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. — 464 с.
10. Померанцев В. В. Термические константы твердого топлива // Исследования процессов горения натурального топлива. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1948. — С. 97–103.
11. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. — М.: Энергия, 1977. — 328 с.
12. Быковец В. В., Лакомский В. И., Кириленко В. П. Измерение удельного электрического сопротивления термоантрацита в тонком слое // Современная электрометаллургия. — 2004. — № 1. — С. 49–51.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 17.06.2003