



УДК 669.187.

© 2009

Член-кореспондент НАН України **В. Й. Лакомський, Д. Д. Міщенко, В. І. Галинич**

Питомий електричний опір електродного термоантрациту в компактному стані при температурах 1500–2540 °С

Отримано експериментальні дані про питомий електричний опір компактного електродного термоантрациту при температурах 1500–2540 °С.

Виконуючи замовлення Дніпровського електродного заводу ВАТ “Український графіт” (м. Запоріжжя) щодо енергозбереження при виробництві електродного термоантрациту, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України почав з того, що досконало вивчив електричні та електроконтактні властивості цього матеріалу [1]. Як не дивно, але ці властивості термоантрациту до того часу ніким не вивчалися, незважаючи на декілька десятиріч експлуатації в багатьох країнах світу електричних печей шахтного типу для його виробництва. Вивчення вказаних властивостей дозволило співробітникам інституту проаналізувати роботу потужних шахтних електропечей заводу для відпалювання антрациту (7 печей по 1800 кВА кожна) і розробити нову технологію, яка призвела до скорочення вдвічі витрат електроенергії (з 1500 до 725 кВт·год на тону вугілля) та значно підвищити якість електродного термоантрациту [2, 3].

За умовами ДСТУ 3408 — 96, якщо питомий електроопір подрібненої проби термоантрациту буде складати 1000 мкОм·м і нижче, то такий електродний термоантрацит вважається придатним для подальшого використання, а якщо нижче 950 мкОм·м, то це вже продукт вищого гатунку. Одержуваний же за новою технологією термоантрацит має опір нижче 800, а 65% всього продукту відпалу антрациту має питомий опір нижче 650 мкОм·м. Нам не відомі споріднені підприємства а ні в Росії, а ні в дальньому зарубіжжі, які б виробляли подібний за якістю електродний термоантрацит.

Нині в світі виробляється понад 20 мільйонів тон цього чудового матеріалу, електропровідність якого знаходиться на рівні деяких металів. Цей матеріал використовується у феросплавній та алюмінієвій промисловостях, але його електричні властивості вивчено вперше у світі тільки в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України в 2003 році [4].

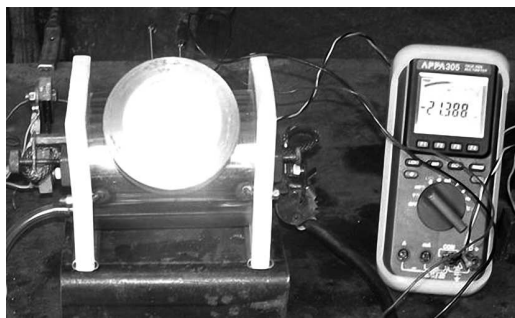


Рис. 1. Камера для вимірювання електричного опору термоантрациту

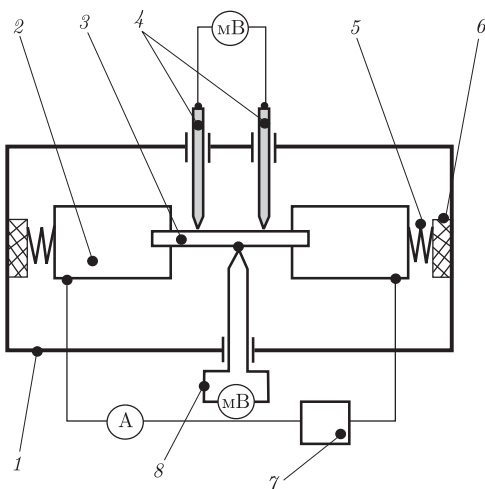


Рис. 2. Структурна схема установки для вимірювання електричного опору термоантрациту:
 1 — камера; 2 — мідно-графітові струмопідводи; 3 — зразок термоантрациту; 4 — потенціометричні щупи;
 5 — пружина; 6 — електроізоляційна прокладка; 7 — джерело струму; 8 — термопара

Вказана робота була виконана при невисоких температурах (до 650 °С). В той же час за новою технологією вугілля нагрівається в шахтних печах, так званих електрокальцинаторах, до 2000 °С і вище.

Ці обставини спонукали нас вивчити питомий опір термоантрациту у компактному стані до температур його відпалу в електрокальцинаторах.

1. Вимірювальне устаткування та деякі методичні питання. Створене нами експериментальне обладнання для вимірювання електричного опору термоантрациту істотно відрізняється від попереднього [4]. Для того щоб запобігти окисненню вуглецевого матеріалу при його нагріванні, створена щільна камера з нержавіючої сталі, заповнена аргоном (рис. 1). Структурну схему цього обладнання показано на рис. 2.

Температура зразка термоантрациту на цьому обладнанні вимірюється контактним методом за допомогою вольфрам-ренієвої термопари. Щоб запобігти науглецюванню гарячого спаю термопари і зміни в зв'язку з цим характеристики термопари, його напилювали високодисперсним оксидом алюмінію¹, застосували для цього мікроплазмотрон.

¹Творчий внесок у створення вимірювального устаткування та особливо напилення оксиду алюмінію зробили співробітники Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України Ю. М. Переверзев та А. К. Радіонов.

Спостереження за ходом прямого нагрівання електричним струмом вуглецевого зразка проводили через кварцове віконце діаметром 100 мм, а електричний струм підводили до зразка не через вольфрамові електроди, як у роботі [4], а за допомогою мідно-графітових щіток від потужних електромашин постійного струму. Це забезпечило надійний електричний контакт між струмопідводами та зразком без локального розігріву контактної плями.

Зразки компактного термоантрациту для вимірювання питомого електроопору перетином від 5×5 до 6×6 мм, довжиною 35 мм і дещо більше виготовляли за нашим проханням на Дніпровському електродному заводі шляхом випилювання їх алмазним інструментом з відносно великих шматків термоантрациту, одержуваного в опалюваній газом до $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ барабанній печі. Барабанна піч була вибрана нами з тієї точки зору, що в неї найкраще з усіх інших печей переміщується антрацитова шихта, і тому її фракційний склад найбільш широкий від 15 до 40 мм, а властивості термоантрациту не залежать від розміру фракції.

Деякі уральські вчені [5] вважають, що виготовити зразки компактного термоантрациту взагалі неможливо через крихкість і анізотропність як антрациту, так і його продукту відпалу — термоантрациту і тому визначити питомий електричний опір компактного термоантрациту просто неможливо. Це дивно чути від росіян, які стараннями М. С. Лєскова відзначились на весь світ тим, що вміють підкувати блоху. Наші зразки з термоантрациту виробляли пересічні робочі з цеху механічної обробки вуглецевих матеріалів Дніпровського електродного заводу.

Щоправда, вихід придатних для вимірювання зразків при цьому був вельми малий $\approx 10\%$. Під час візуального контролю доводилося відбраковувати багато зразків через сколи, тріщини та грубі неоднорідності.

Широко відомо, що антрацит і, природно, термоантрацит є матеріалами анізотропними, які відзначаються пластинчастою структурою. В зв'язку з цим зразки для вимірювання опору вирізалися вздовж пластинчастої структури і тому одержані експериментальні дані питомого електричного опору (ПЕО), строго кажучи, характеризують повздовжню, а не поперечну електропровідність (опір) цього вельми анізотропного матеріалу.

Щодо безпосередніх вимірювань електричного опору термоантрациту на його зразках, то, на наш погляд, треба перед тим, як викласти результати вимірювань ПЕО, дати деякі методичні пояснення. Це треба зробити ще й тому, що ми виконуємо нинішню роботу вперше в світі після теоретичних пошуків, виконаних ще в середині минулого століття відомим американським вченим у галузі твердих вуглецевих матеріалів С. Мрозовським [6]. Він показав, що коли йдеться про вимірювання ПЕО прогартованого двофазного вуглецевого матеріалу (в нашому випадку термоантрациту) при температурах, вищих від температури гартування, то кожне вимірювання необхідно виконувати тільки в стані повної структурної рівноваги між фазами. Якщо говорити про термоантрацит, то це буде рівновага між аморфним вуглецем і дрібнозернистим графітом. Інакше кажучи, перед кожним вимірюванням ПЕО при будь якій температурі, якщо вона вища від температури гартування, кожний зразок термоантрациту обов'язково треба витримати при температурі вимірювання досить довго, щоб завершилися процеси графітизації аморфного вуглецю і була досягнута структурна рівновага, відповідно до вказаної температури. Якщо ці вимоги будуть витримані, одержані експериментальні дані можна вважати цілком вірогідними.

Ці теоретичні положення С. Мрозовського були прийняті нами, і в усіх випадках визначення ПЕО при температурах вище $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ми знімали на приладах (див. рис. 1) показання сили струму і падіння напруги на дистанції 20 мм тільки після достатньої витримки зраз-

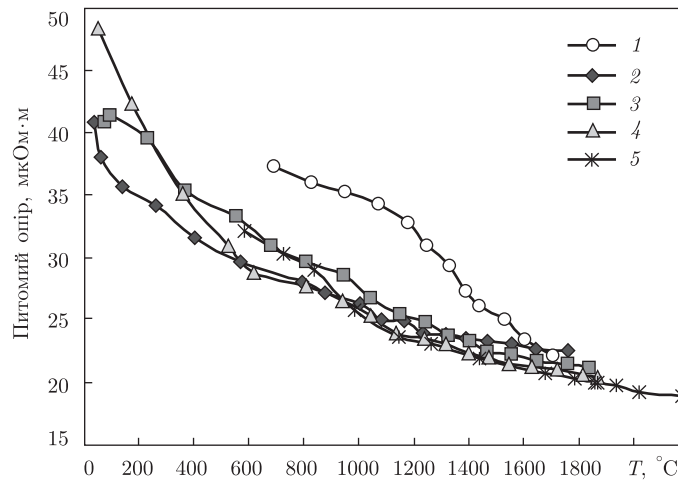


Рис. 3. Температурна залежність питомого електричного опору термоантрациту: 1–5 — порядок послідовних випробувань одного й того ж зразка

ка при температурі вимірювання, коли продовження терміну витримки не призводило до зміни показань приладів.

Такі методики експериментального визначення ПЕО при температурах, вищих за температуру відпаду.

2. Результати експериментів. Досліджувався електродний термоантрацит, одержаний з донбаського антрациту поставки Свердловської центральної збагачувальної фабрики.

Було виконано п'ять послідовних серій вимірювання ПЕО одного й того ж зразка. Як можна бачити на рис. 3, одержані результати вимірювання ПЕО серій 2–5 добре збігаються, лише перша серія показала результати, що відрізняються від інших чотирьох при температурах нижче 1600 °C. Вище цієї температури результати визначення ПЕО всіх п'яти зразків добре збігаються. Це свідчить про те, що під час першого нагрівання відбулась графітизація основної маси аморфного вуглецю.

Аналіз одержаних результатів вимірювання свідчить про те, що:

з ростом температури від 1500 до 2000 °C чисельне значення ПЕО термоантрациту, як і в низькотемпературній області [4, 7], знижується;

чисельне значення ПЕО термоантрациту при 2000 °C доволі низьке (нижче 20 мкОм·м), воно наближається до ПЕО металевих сплавів, які використовуються в електронагрівальних пристроях;

у температурному інтервалі 1500–2000 °C знак температурного коефіцієнта питомого електроопору β (ТКПЕ) термоантрациту зберігається, як і при низьких температурах, від'ємним, але його чисельне значення на один — півтора порядки менше, ніж при 200–500 °C [7], тобто чисельне значення ТКПЕ наближається до нуля;

С. Мрозовський у своїх роботах [6] передбачив, що ТКПЕ термоантрациту повинен при досягненні певної температури змінити свій знак на додатний. Для того щоб експериментально довести існування інверсії знака коефіцієнта β , ми заміряли чисельне значення ПЕО одного із зразків термоантрациту тієї ж поставки антрациту в температурному інтервалі 658–2540 °C і одержали такі результати:

T , °C: 658; 868; 1043; 1166; 1285; 1525; 1789; 1869; 1961; 2179; 2369; 2540;
 ρ , мкОм·м: 18,5; 17,6; 16,8; 16,1; 15,9; 15,3; 14,3; 13,8; 13,6; 13,5; 13,2; 13,4.

Наведені дані свідчать про те, що перегин функції $\rho = f(T)$, який відповідає інверсії знаку β , знаходиться десь у районі 2179–2369 °С. Розмитість району інверсії знаку β свідчить, на нашу думку, про малу дифузійну швидкість перебудови аморфного вуглецю в графітову структуру.

Цікавим також є той факт, що зразки термоантрациту, нагріті до цих температур, отримували здатність писати по паперу, як і природний графіт.

На завершення хотілося б відзначити, що виконані вимірювання ПЕО термоантрациту, хоча і через півстоліття, експериментально підтвердили геніальну догадку С. Мрозовського про поведінку сучасного матеріалу — термоантрациту в широкому інтервалі температур.

1. *Лакомский В. И.* Электрические и электроконтактные свойства электродного термоантрацита. – Киев: Академперіодика, 2008. – 104 с.
2. *Петров Б. Ф.* Энергосбережение в производстве электродного термоантрацита. – Киев: Екологія, 2006. – 144 с.
3. *Патон Б. Е., Лакомский В. И.* Производство электродного термоантрацита // Цветные металлы. – 2008. – № 1. – С. 55–60.
4. *Быковец В. В., Лакомский В. И.* Удельное электрическое сопротивление термоантрацита // Совр. электрометаллургия. – 2003. – № 4. – С. 41–44.
5. *Чернобровин В. П., Михайлов Г. Г.* Электропроводность угольной составляющей шихты самоспекающихся электродов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 5. – С. 23–27.
6. *Шулепин С. В.* Физика углеродистых материалов. – Москва: Металлургия, 1972. – 255 с.
7. *Лакомский В. И.* К вопросу о температурном коэффициенте электросопротивления термоантрацита // Доп. НАН України. – 2006. – № 10. – С. 103–108.

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона
НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 26.09.2008

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **V. J. Lakomsky, D. D. Mischenko, V. I. Galinich**

Electric resistivity of compact electrode thermoanthracite in the temperature range 1500–2540 °C

For the first time, the experimental data on the resistivity of compact electrode thermoanthracite in the temperature range 1500–2540 °C are obtained.