

18. Gupta, K. P. The Fe-Ni-Ti System Update (Iron-Nickel-Titanium) [Text] / K. P. Gupta // Journal of Phase Equilibria. – 2001. – Vol. 22, Issue 2. – P. 171–175. doi: 10.1361/105497101770339148
19. Raghavan, V. Fe-Ni-Ti (Iron-Nickel-Titanium) [Text] / Raghavan V. // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2012. – Vol. 33, Issue 3. – P. 238–239. doi: 10.1007/s11669-012-0071-7

Розроблена установка для вимірювання питомого електричного контактного опору контактних пар різних матеріалів у залежності від тиску стиснення і температури. Отримані експериментальні дані з питомого електричного контактного опору мідь-графіт та графіт-терморозширений графіт-графіт у залежності від тиску і температури, виконано порівняння результатів з відомими літературними даними

Ключові слова: питомий електричний контактний опір, мідь, графіт, терморозширений графіт, тиск, температура

Разработана установка для измерения удельного электрического контактного сопротивления контактных пар различных материалов в зависимости от давления сжатия и температуры. Получены экспериментальные данные по удельному электрическому контактному сопротивлению медь-графит и графит-терморасширенный графит-графит в зависимости от давления и температуры, выполнено сопоставление результатов с известными литературными данными

Ключевые слова: удельное электрическое контактное сопротивление, медь, графит, терморасширенный графит, давление, температура

УДК 537.311.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27989

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАФИТА С МЕДЬЮ И ТЕРМОРАСШИРЕННЫМ ГРАФИТОМ

А. Я. Карвацкий

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: admin@rst.kiev.ua

С. В. Лелека

Кандидат технических наук, научный сотрудник**

И. В. Пулинец

Кандидат технических наук, научный сотрудник**

E-mail: i_pulinets@rst.kiev.ua

Т. В. Лазарев

Аспирант*

А. Ю. Педченко

Аспирант*

E-mail: admin@rst.kiev.ua

*Кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения***

**Научно-исследовательский центр

«Ресурсосберегающие технологии»***

***Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

Применение математического моделирования дает возможность получать достаточно полную информацию о технологических процессах и аппаратах различных отраслей промышленности. Разработка математических моделей промышленных агрегатов и протекающих в них процессов является эффективным способом поиска оптимальных технологических режимов и обеспечения стабильной работы оборудования, позволяющих без проведения сложных и дорогостоящих лабораторно-промышленных экспери-

ментов проводить исследования и совершенствовать технологии методом вычислительного эксперимента.

Качество моделирования в основном определяется информативностью, точностью и полнотой воспроизведения математической моделью исследуемого объекта. При этом разработанные численные модели верифицируются на данных натурных экспериментов, результаты которых также используются для задания граничных условий и физических свойств материалов при проведении численных экспериментов.

При разработке численных моделей важную роль играют электрические свойства контактного взаимо-

действия. Например, в печах прямого графитирования существуют следующие контактные пары: медь-графит и графит-графит. С целью снижения контактного сопротивления последнего на производстве зачастую его заменяют соединением графит-прокладка-графит, используя прокладку на основе терморасширенного графита [1]. При численном моделировании массовыми свойствами прокладки можно пренебрегать, при этом контактное сопротивление оказывает существенное влияние на теплоэлектрическое состояние печи графитирования. Отсутствие в литературных источниках данных о контактном сопротивлении перечисленных пар и определяет актуальность данного исследования.

2. Литературный обзор

Участки сочленения разнородных проводников называют контактными соединениями. Сопротивление этих участков всегда выше, чем контактирующих элементов, следовательно, на этих участках возникают дополнительные потери энергии.

Свойства электрического контакта определяются следующими факторами: величиной площади контакта, качеством контактной поверхности и контактным давлением. Из литературных источников известно [2, 3], что фактическая площадь контакта составляет незначительную долю видимой площади соприкосновения, определяемой геометрическими размерами соприкасающихся поверхностей. Отсутствие сплошности контакта при соприкосновении поверхностей существенно меняет картину течения электрического тока от одного тела к другому. Контактные пятна, общая площадь которых мала по сравнению с видимой поверхностью соприкосновения, равномерно распределены по поверхности контакта, а расстояние между ними значительно превышает высоту микрошероховатостей [4]. Таким образом, дискретный характер соприкосновения твердых тел является основной причиной повышенного электрического сопротивления между контактирующими плоскостями. При таком подходе электрическое сопротивление контакта в целом можно рассматривать как своего рода поверхностный эффект, связанный с электрическими и механическими свойствами соприкасающихся тел и свойствами окружающей среды. Установлено, что по мере приближения к поверхности соприкосновения линии тока стягиваются к точкам фактического контакта (рис. 1) [5].

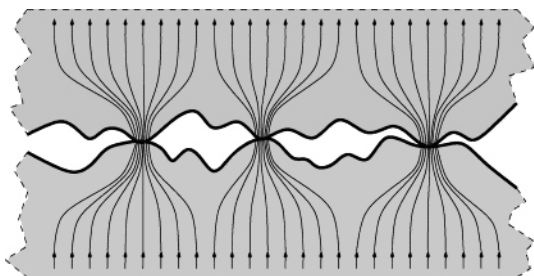


Рис. 1. Сужение линий тока на границе контактов шероховатых поверхностей

Наиболее сложной задачей исследования переходного контактного сопротивления является опреде-

ление фактической площади контакта. Поверхности контакта могут быть гладкими, шероховатыми, неправильной формы (рис. 2), в соответствии с этим возможны разные фактические площади соприкосновения, величина которых обусловлена характером деформации микровыступов [6].

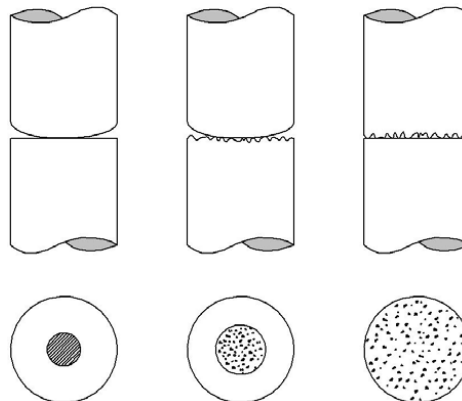


Рис. 2. Схема типичных механических контактов

Теоретическое решение задачи о фактической площади касания реальных поверхностей весьма затруднительно, поэтому широкое распространение при исследовании сопротивления электрических контактов твердых тел получили экспериментальные методы.

Авторами [2, 3] исследовалось сопротивление контакта различных пар с графитированными электродами в зависимости от давления сжатия. Результаты этих исследований для контактного взаимодействия медь-графит приведены на рис. 3.

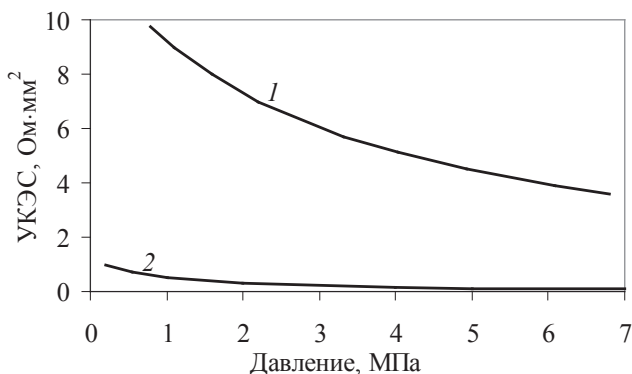


Рис. 3. Зависимость удельного электрического контактного сопротивления медь-графит от давления: 1, 2 – литературные данные [2] и [3], соответственно

Анализ результатов этих исследований показывает схожий экспоненциальный характер кривых, но их численные значения отличаются на порядок, что может быть связано с разной шероховатостью контактных поверхностей исследованных материалов. Использовать литературные данные для численного анализа, не имея данных о шероховатости поверхностей, является некорректным.

Исследования [7] посвящены контактному соединению стали и графита в электролизерах алюминиевого производства. Авторами разработана экспери-

ментальная установка исследования удельного электрического контактного сопротивления (УЭКС) сталь-графит (температура 20–1000 °С, давление сжатия 0,1–10 МПа) и выполнены численные расчеты контактного сопротивления сталь-графит с использованием коммерческого программного кода ANSYS, результаты этих исследований приведены на рис. 4.

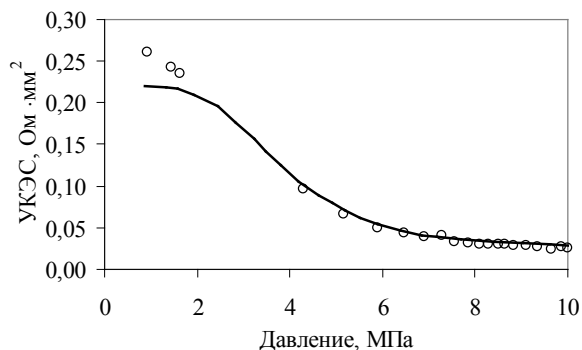


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования УЭКС сталь-графит при температуре 747 °С [7]

Анализ результатов этих исследований показывает согласование экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Характер изменения УЭКС пары сталь-графит аналогичный паре медь-графит, но имеет на порядок ниже диапазон значений.

Исследования электрического контакта графит-прокладка-графит в литературных источниках отсутствуют. Поэтому разработка методики и экспериментальной установки для исследования УЭКС контактных пар указанных материалов является актуальной задачей.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является получение температурной зависимости УЭКС контактных пар медь-графит и графит-прокладка-графит.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка экспериментальной установки по определению УЭКС контактных пар твердых материалов;
- оценка погрешности экспериментального определения УЭКС;
- экспериментальные исследования УЭКС медь-графит и графит-прокладка-графит, сопоставление с данными других авторов.

4. Экспериментальные исследования УЭКС контактных пар медь-графит и графит-прокладка-графит и обсуждение результатов

Для экспериментального исследования переходного электрического сопротивления контактных пар разработана специальная экспериментальная установка (рис. 5, а, б), в основу которой положены разработки авторов [8, 9] для исследования УЭКС металлических и графитовых контактов между собой.

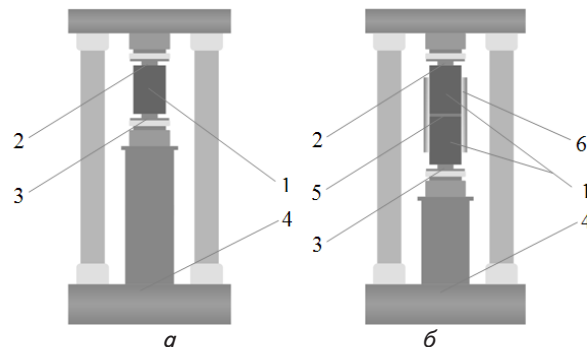


Рис. 5. Схема установки по определению УЭКС: а — медь-графит; б — графит-прокладка-графит; 1 — графитовые образцы Ø 30×40 мм; 2, 3 — нижний и верхний медные токоподводы; 4 — гидравлический пресс; 5 — прокладка (вспученный графит); 6 — электрический нагреватель

Методика измерения УЭКС медь-графит заключается в следующем: образец материала 1 (рис. 6, а) с контактными парами помещается в гидравлический пресс 4, который обеспечивает заданное усилие сжатия; образец подключается к электропитанию через медные контакты 2, 3 (рис. 6, б), размещенные на двух его торцах с силой постоянного тока — 5 А; с помощью измерительного комплекса [10] осуществляются измерения напряжения на токоподводах, графитовом образце и в зоне их контакта. Используя полученные значения, величина УЭКС определяется по формуле:

$$\rho_c = \frac{U_c}{I_c} S_c,$$

где ρ_c — удельное электрическое контактное сопротивление, Ом·м²; I_c — сила тока, А; U_c — падение напряжения в зоне контактной пары, В; S_c — площадь сечения контакта, м².

Для сопоставления с литературными данными, экспериментальные измерения УЭКС контактной пары медь-графит получены для аналогичных давлений [2, 4]. Диапазон полученных экспериментальных данных (рис. 7) согласуется с литературными данными.

Также проведена оценка УЭКС медь-графит по теоретическим зависимостям [11]. Сопоставление данных результатов эксперимента и расчета, полученных при температуре 16 °С и давлении сжатия 1,7 МПа на 1 см², показывает согласование в пределах погрешности 4–5 %.

При исследовании УЭКС графит-прокладка-графит в гидравлический пресс устанавливается два графитовых образца, между которыми помещается прокладка из терморасширенного графита (рис. 6, в).

Поскольку контакт графит-прокладка-графит в реальных условиях работы находится в рабочем объеме печи (при температуре до 3000 °С), следовательно, для получения температурной зависимости УЭКС в установке предусмотрен нагрев с использованием электрического нагревателя 6. Температура в зоне контактной пары контролируется с помощью ХА термопары. Исследования проводились до температуры 250 °С (рис. 8) при постоянном давлении с последующей экстраполяцией до 3000 °С (рис. 9).

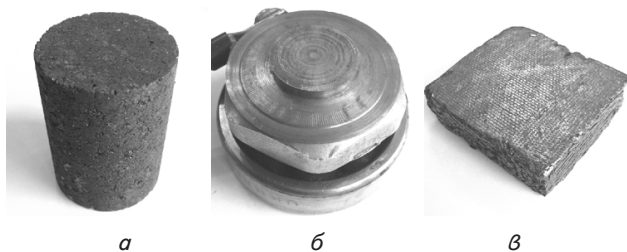


Рис. 6. Исследуемые материалы: а – графитовый образец; б – медный токоподвод; в – прокладка из терморасширенный графит

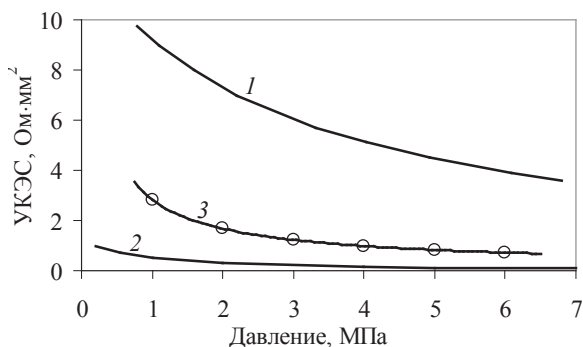


Рис. 7. Зависимость УЭС медь-графит от давления: 1, 2 – литературные данные [2] и [3], соответственно; 3 – экспериментальные данные

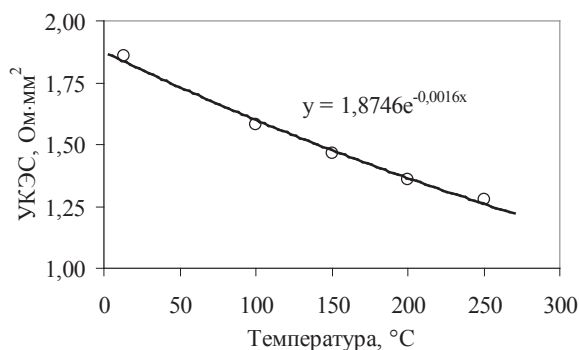


Рис. 8. Температурная зависимость УЭС графит-прокладка-графит

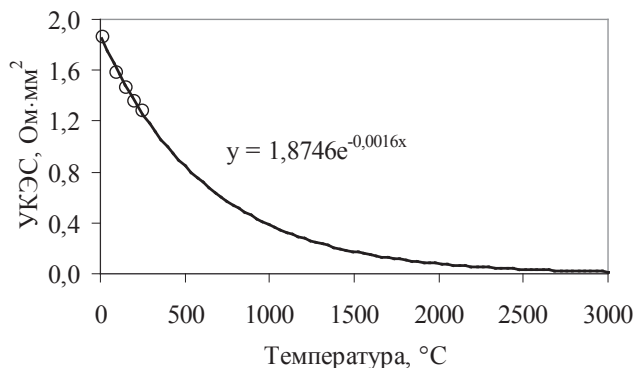


Рис. 9. Экстраполяция температурной зависимости УЭС графит-прокладка-графит до 3000 °С

Анализ полученных данных показывает, что температурная зависимость УЭС графит-прокладка-графит носит экспоненциальный характер и при уровне температур более 2500 °С практически не изменяется и составляет $1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м².

6. Выводы

В результате проведенной работы разработана установка для определения температурной зависимости электрического сопротивления контакта различных материалов в зависимости от давления сжатия и температуры.

Проведена оценка достоверности полученных экспериментальных данных УЭС медь-графит, которая показала согласование с литературными данными, а также с аналитическими расчетными данными в пределах погрешности 4–5 %.

Получены экспериментальные данные УЭС контактных пар: медь-графит при постоянной температуре в зоне контакта 16 °С и давлении сжатия 1–7 МПа на 1 см²; графит-прокладка-графит при постоянном давлении сжатия 1,7 МПа на 1 см² и температуре в зоне контакта 16–250 °С, которые необходимы для выполнения численного анализа теплоэлектрического состояния печей графитирования углеграфитовых заготовок при разработке и модернизации промышленного оборудования.

Литература

1. Пат. 2343112 Российская Федерация, МПК7 С 01 В 31/04, С 04 В 35/536. Способ получения электроконтактной прокладки [Текст] / Ионов С. Г., Павлов А. А., Савченко Д. В., Селезнев А. Н., Авдеев А. Н., Фокин В. П., Обыденная Н. П. – заявитель и патентообладатель ЗАО «УНИХИМТЕК». – № 2007118260/15; заявл. 17.05.07; опубл. 10.01.09, Бюл. № 1. – 11 с.
2. Чалых, Е. Ф. Оборудование электродных заводов: учеб. пособие для вузов [Текст] / Е. Ф. Чалых. – М.: Металлургия, 1990. – 238 с.
3. Лутков, А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов [Текст] / А. И. Лутков. – М.: Металлургия, 1990. – 175 с.
4. Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление [Текст] / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
5. Slade, P. G. Electrical Contacts: Principles and Applications [Text] / P. G. Slade; 2nd ed. – Florida: CRC Press, 2014. – 1268 p. doi: 0.1201/b15640
6. Yovanovich, M. M. Four Decades of Research on Thermal Contact, Gap, and Joint Resistance in Microelectronics [Text] / M. M. Yovanovich // Components and Packaging Technologies. – 2005. – Vol. 28, Issue 2. – P. 182–206. doi:10.1109/tpcpt.2005.848483

7. Richard, D. Carbon to cast iron electrical contact resistance constitutive model for finite element analysis [Text] / D. Richard, M. Fafard, R. Lacroix, P. Clery, Y. Maltais // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 132, Issue 1. – P. 119–131. doi:10.1016/s0924-0136(02)00430-2
8. Pradille, C. An experimental study to determine electrical contact resistance [Text] / C. Pradille, F. Bay, K. Mocellin // In Electrical Contacts. Proceeding of the 56th IEEE Holm conference on Electrical Contacts. – Charleston, South Carolina, USA : 2010. – P. 1–5. doi:10.1109/holm.2010.5619522
9. Song, Q. An experimental study determines the electrical contact resistance in resistance welding [Text] / Q. Song, W. Zhang, B. Niels // Welding Journal. – 2005. – Vol. 92, Issue 2. – P. 73–76.
10. Панов, Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов [Текст] / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28–30.
11. Мышкин, Н. К. Электрические контакты [Текст] / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. – М.: Интеллект, 2008. – 560 с.

В якості основної сировини, для синтезу керамічних мас, для виробництва керамічних клінкерних виробів, вибрано полімінеральну глинисту сировину з відсутнім інтервалом спікання.

Досліджено способи направлено регулювання структуроутворення керамічних мас на основі полімінеральної глини з використанням каолінит-польовошпатової сировини. На основі дослідних мас отримано керамічні клінкерні вироби з широким інтервалом спікаючого стану (100 °С)

Ключові слова: структуроутворення, глина, каолін, пегматит, спікання, клінкер, склад, властивості, інтервал, сировина

В качестве основного сырья для синтеза керамических масс, для производства керамических клинкерных изделий, выбрано полиминеральное глинистое сырье с отсутствующим интервалом спекания.

Исследованы способы направленного регулирования структурообразования керамических масс на основе полиминеральной глины с использованием каолинит-полевошпатового сырья. На основе исследовательских масс получено керамические клинкерные изделия с широким интервалом обжига состояния (100 °С)

Ключевые слова: структурообразования, глина, каолин, пегматит, спекания, клинкер, состав, свойства, интервал, сырье

УДК 666.3/7

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28011

РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРО- УТВОРЕННЯ КЕРАМІЧНИХ МАС СИСТЕМИ ГЛИНА ПОЛІМІНЕРАЛЬНА- КАОЛІНІТ- ПОЛЬОВОШПАТОВА СИРОВИНА

Т. В. Оксамит

Головний технолог

ПАТ «Майдан-Вильський комбінат вогнетривів»
вул. Некрасова, с. Михайлючка, р-н Шепетівський,
обл. Хмельницька, Україна, 30416
E-mail: okcamut_t@mail.ru

1. Вступ

В Україні, у зв'язку зі збільшенням вимог до якості будівництва, останні роки простежується динамічне зростання попиту на високоякісні будівельні матеріали. На Європейському ринку будівельних матеріалів відсутня така категорія керамічних виробів, як лицьова цегла. Замість цього на Західному ринку широко використовуються такі високоякісні керамічні вироби, як керамічний клінкер різного призначення. Починаючи з 2006–2007 рр. на Україні було розпочато роботи по розробці та впровадженню нових видів керамічних виробів.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В літературних даних зазначено [1–3], що основною сировиною для отримання високоякісних керамічних клінкерних виробів являються тугоплавкі глини з великим інтервалом між температурою спікання і початком деформації. Вартість такої сировини, з точки зору ринкової економіки, є високою, крім того родовища розташовані в Східній частині України. Отже, використання даної сировини для виробництва керамічних клінкерних виробів обумовить високу собівартість готової продукції, що стримуватиме попит на неї.