

УДК 621.762.1

Стоянов А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованию электропроводности пористых материалов уделяется недостаточное внимание. Однако, как показано в ряде работ [1, 2], электропроводность непосредственно связана с относительной плотностью и другими физическими и структурными характеристиками пористых материалов.

В процессе деформационной и термической обработки порошковых деталей реализуются контактные межчастичные взаимодействия, результатом которых является соединение частиц порошкового тела в конгломерат и формирование его структуры [3]. Процессы контактообразования определяют изменение физических свойств порошковых материалов при обработке. Рядом авторов установлены соотношения между проводимостью порошков и компактных металлических материалов в зависимости от соотношения фактической площади контакта и общей площади поверхности частиц порошка [3, 4]. Учитывая, что площадь контакта между частицами является функцией большинства характеристик порошкового материала, в том числе плотности и электропроводности, представляет интерес, на основе изучения контактных взаимодействий, разработка методов прогнозирования наиболее характерных свойств материала в зависимости от электропроводности. Это позволит упростить существующие и разработать новые методы контроля порошковых изделий.

Целью работы является исследование электропроводности порошковых материалов на основе меди и железа и установление зависимостей между относительной проводимостью и относительной плотностью при компактировании и спекании.

Экспериментальные исследования электропроводности выполнены на образцах размерами $10 \times 10 \times 50$ мм из порошков меди ПМС-1, бронзы ПРБрО10Ф1 и железа ПЖР 3.200.28. Образцы изготавливались двойным прессованием перпендикулярно длинной стороне в наборе матриц, размеры которых рассчитаны так, что образцы с относительной плотностью 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,93 после спекания имели указанные размеры с точностью $\pm 2\%$. В этих же матрицах были спрессованы образцы для исследований сырого порошкового материала, которые не подвергались спеканию. Механической обработкой изготовлены аналогичные образцы из литых материалов – меди М1, бронзы БрО10Ф1 и стали 05 кп, электропроводность которых сравнивалась с электропроводностью порошковых образцов.

Сопротивление образцов измерялось цифровым микроомметром DLRO10X фирмы Megger, после чего рассчитывалось удельное сопротивление материала η и его проводимость r' по известным формулам:

$$\eta = R \frac{s}{\ell} \quad \text{и} \quad r' = \frac{1}{\eta}, \quad (1)$$

где R – сопротивление образца;

s – площадь поперечного сечения образца;

ℓ – длина образца.

На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости относительной проводимости n_k от относительной плотности ρ_x для исследуемых материалов, рассчитанные по формулам:

$$n_k = \frac{r'_x}{r'_m} \quad \text{и} \quad \rho_x = \frac{\rho_0}{\rho_m}, \quad (2)$$

где r'_x – проводимость порошкового материала;

r'_m – проводимость компактного материала;

ρ_0 – плотность порошкового материала;

ρ_m – плотность компактного материала.

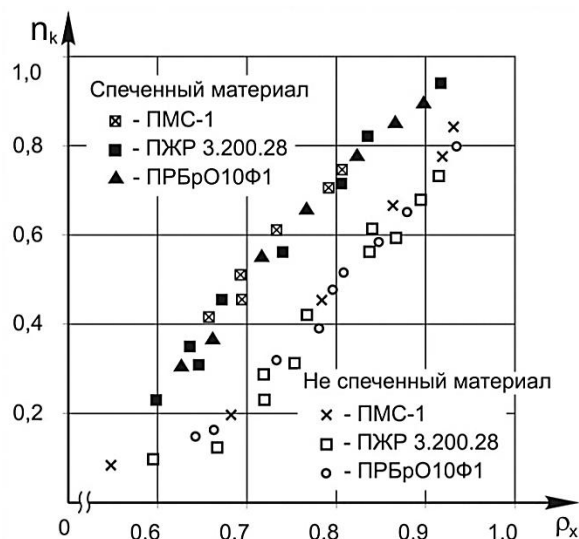


Рис. 1. Экспериментальные зависимости относительной проводимости n_k от относительной плотности ρ_x спеченных и не спеченных образцов

В работе [4] также показано, что для исследованных порошков с достаточной степенью приближения соблюдается соотношение (2), а относительная проводимость n_k или приведенный коэффициент контакта, определяется как:

$$n_k = \frac{2f_a}{2f_a + f_f}, \quad (3)$$

где f_a – удельная активная площадь контакта между частицами;

f_f – удельная площадь свободной поверхности частиц.

Для определения n_k примем за модель представительного элемента порошкового тела совокупность произвольно уложенных сферических частиц и рассмотрим аналогично [2] влияние процессов течения и уплотнения порошковой среды на изменение формы и пространственное распределение частиц, ее составляющих.

Рассмотрим частицу среды произвольной геометрии. Вокруг любой частицы всегда можно описать определенную пространственную фигуру так, чтобы сумма объемов описанных фигур совпадала с объемом исследуемого пространства пористой среды. Причем всегда можно подобрать такие фигуры произвольной формы, чтобы сумма площадей несовпадающих поверхностей описанных фигур была равна нулю. Таким образом, описанное пространство будем далее рассматривать статистически. Простым усреднением по характерным размерам объемов описанных около частиц и их форм при вариации физических условий сведем реальное распределение частиц к линейному со средним характерным размером описанных объемов (рис. 2).

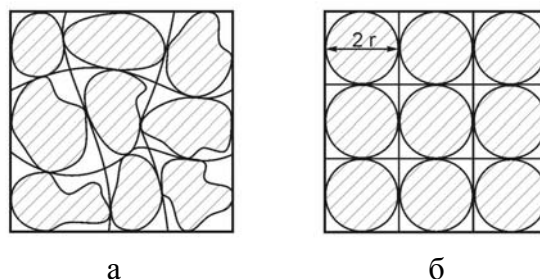


Рис. 2. Фрагменты сечений реального порошкового материала с контурами объемов, описанных вокруг частиц (а) и усредненного по параметрам порошкового материала (б)

Допустим, что порошковая среда состоит из частиц радиусом r . Тогда начальная удельная площадь свободной поверхности f_{f0} единицы объема порошковой среды в зависимости от ее плотности ρ_0 определяется как:

$$f_{f0} = 4\pi \cdot r^2 \cdot n_0, \tag{4}$$

где n_0 – начальное число частиц в единице объема:

$$n_0 = \frac{\rho_0}{\frac{4}{3}\pi \cdot r^3}, \tag{5}$$

или после подстановки (5) в (4):

$$f_{f0} = \frac{1}{3}r \cdot \rho_0. \tag{6}$$

Считая, что среднее число контактов каждой частицы с окружающими есть координационное число K_x [5] и радиус пятна контакта равен x , получим, что общая контактная поверхность одной частицы $K_x \cdot \pi \cdot x^2$.

Тогда удельная площадь свободной поверхности n_x частиц порошковой среды при силовом воздействии:

$$f_{fx} = n_x(4\pi r^2 - K_x \pi x^2) = \frac{\rho_x}{\frac{4}{3}\pi r^3} (4\pi r^2 - K_x \pi x^2) = \rho_x \frac{3}{r} \left[1 - \frac{K_x}{4} \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right]. \tag{7}$$

Зависимость между плотностью и изменением линейного размера объема порошковой заготовки при уплотнении легко записать через степень деформации:

$$\varepsilon = \frac{\ell_0 - \ell}{\ell_0} = 1 - \frac{\ell}{\ell_0} = 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_x} \right)^{1/3}. \tag{8}$$

С другой стороны, при сжатии сферы в цилиндрическом контейнере степень деформации в некотором приближении можно представить в виде [6]:

$$\varepsilon = \frac{r - \sqrt{r^2 - x^2}}{r} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2}. \tag{9}$$

Тогда:

$$\left(\frac{x}{r}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_x}\right)^{2/3}. \quad (10)$$

После подстановки в (7) имеем:

$$f_{fx} = \rho_x \frac{3}{r} \left\{ 1 - \frac{K_x}{4} \left[1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_x}\right)^{2/3} \right] \right\}. \quad (11)$$

Решив уравнение (3) относительно f_a , и подставив $f_{fx} = f_f$ из уравнения (10), получим:

$$f_a = \frac{n_k}{2(1-n_k)} \cdot \rho_x \frac{3}{r} \left\{ 1 - \frac{K_x}{4} \left[1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_x}\right)^{2/3} \right] \right\}. \quad (12)$$

Для определения взаимосвязи изменения проводимости порошковой среды с изменением ее плотности представим n_k , согласно [4] в следующем виде:

$$n_k = \frac{2(K_v \pi x^2)}{2(K_v \pi x^2) + (4n_x \pi r^2 - 2K_v \pi x^2)}, \quad (13)$$

где K_v – общее число контактов в единице объема;

n_x – число частиц в единице объема.

После преобразований, учитывая, что $K_v/2n_x = K_x$, имеем:

$$n_k = K_x \left(\frac{x}{r}\right)^2 = K_x \left[1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_x}\right)^{2/3} \right]. \quad (14)$$

Тогда:

$$\frac{r_x}{r_m} = K_x \left[1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho_x}\right)^{2/3} \right]. \quad (15)$$

Исходя из краевых условий при $\rho_x = 1$, $n_k = 1$, откуда:

$$\rho_0 = \left(\frac{K_x - 1}{K_x}\right)^{3/2}, \quad (16)$$

а уравнение (14) примет вид:

$$n_k = K_x \left\{ 1 - \left[\frac{1}{\rho_x} \left(\frac{K_x - 1}{K_x}\right)^{3/2} \right]^{3/2} \right\}. \quad (17)$$

Полученное соотношение дает семейство кривых $n_k = n_k(\rho_x)$, показанное на рис. 3.

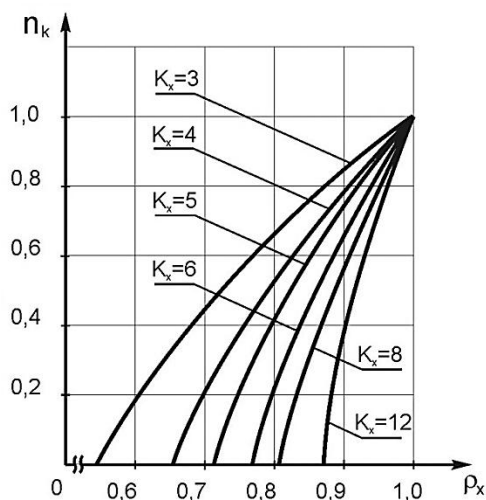


Рис. 3. Относительная проводимость порошкового материала n_k в зависимости от относительной плотности ρ_x и координационного числа K_x

Очевидно, что уравнение (12) позволяет достаточно реально оценить удельную активную площадь контакта в том случае, если с необходимой точностью определен параметр K_x , так как именно он задает точность вычисления n_k .

Из вышеприведенной оценки следует, что весьма важным условием достоверности выбранных по диаграмме рис. 3 значений K_x является малая величина среднеквадратичного отклонения экспериментальных результатов от зависимости (17).

На рис. 4 показаны полученные в работе экспериментальные результаты, в сравнении с кривыми, полученными по уравнению (17). Также приведены аналогичные данные [4] для порошка карбонильного железа.

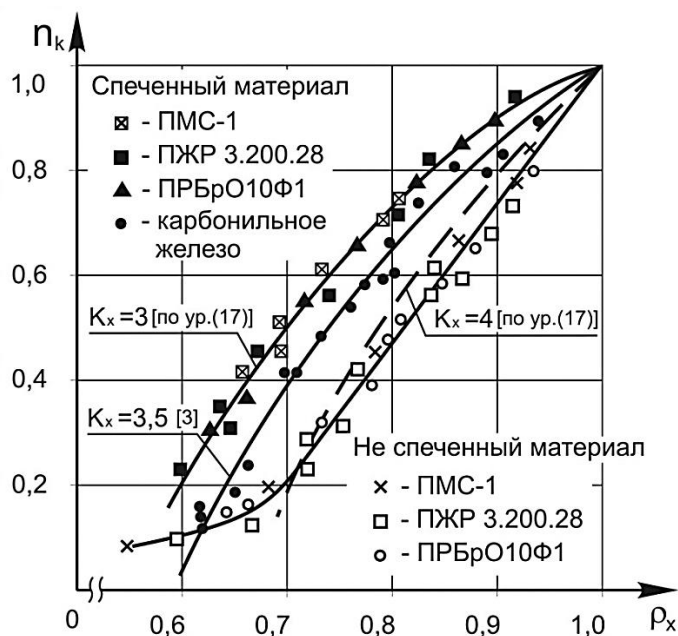


Рис. 4. Сравнение экспериментальных результатов с теоретическими кривыми, полученными по уравнению (17)

Из рассмотрения данных следует, что экспериментальные результаты для спеченных порошковых материалов в сравнении с теоретическими кривыми для соответствующего координационного числа, показывают удовлетворительную сходимость результатов, позволяющую сделать вывод о возможности практического приложения расчетов. Для не спеченного материала данная закономерность нарушается, по меньшей мере, по двум причинам: 1) проводимость контактных областей в неспеченной прессовке меньше, чем перемычек, образующихся при спекании, и 2) в процессе спекания происходят относительные смещения частиц и изменение структурных параметров материала, в результате чего меняется координационное число.

Следует отметить, что оба указанных фактора усложняют ход зависимости $n_k = n_k(\rho_x)$ и поэтому определение координационного числа K_x необходимо проводить аналогично [5] с учетом угла межчастичного трения. Согласно [5, 7] для двухкомпонентной смеси с диаметром частиц d_1 и d_2 и угле трения φ координационное число определяется выражением:

$$K_{1,2} = \frac{(0,804 - 1,07 \sin^2 \varphi) \cdot (d_1/d_2 + 1)}{1 + d_1/d_2 - \sqrt{(d_1/d_2) \cdot (d_1/d_2 + 2)}}. \quad (18)$$

Таким образом, решение задачи определения плотности спеченного порошкового изделия может быть сведено к определению проводимости порошкового материала.

ВЫВОДЫ

Выполнены экспериментально-теоретические исследования электропроводности порошковых материалов на основе меди и железа, установлены зависимости между относительной проводимостью и относительной плотностью при компактировании и спекании. Получено соотношение для расчета плотности порошкового тела по результатам оценки электропроводности и определения координационного числа. Показано, что решение задачи определения плотности порошкового изделия может быть сведено к определению проводимости порошкового материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. С. Расчет обобщенной проводимости механических смесей / А. С. Воробьев, С. В. Серебрянников // Порошковая металлургия. – 1986. – № 6. – С. 18–22.
2. Фатеев Е. Г. Электропроводность пористых сред при деформациях сжатия / Е. Г. Фатеев // Журнал технической физики. – 1990. – Т. 1, № 2. – С. 72–77.
3. Скороход В. В. Физико-металлургические основы спекания порошков / В. В. Скороход, С. М. Соломин. – М. : Металлургия, 1984. – 159 с.
4. Chermant Z. Modelisation des proprietes morphologiques et physiques des materiaux frites en phase solid / Z. Chermant, M. Coster, J. Jernot // Met. et etud. sci. Rev. met. – 1984. – 81, No. 1. – P. 5–18.
5. Suzuki M. Estimation of the co-ordination number in a two-component mixture of cohesive spheres / M. Suzuki, T. Oshima // Powder Technol. – 1983. – 36, No. 2. – P. 181–188.
6. Лантев А. М. Расчет силовых характеристик процесса уплотнения сферических порошков / А. М. Лантев, С. В. Подлесный // Порошковая металлургия. – 1985. – № 12. – С. 11–17.
7. Molerus O. Theory of field of cohesive powders / O. Molerus // Powd. Technol. – 1985. – № 12. – P. 259–275.