

Влияние высоковольтной обработки порошковых композиций Fe—Ti—C и Fe—Ti—B—C на изменение их электрического сопротивления

А. Д. Зайченко, О. Н. Сизоненко, Э. И. Тафтай, Н. С. Присташ,
А. С. Торпаков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев,
e-mail: dioo@iipr.com.ua

Изучено влияние высоковольтного электрического разряда на электрическое сопротивление порошковых композиций в зависимости от режима обработки, а также влияние состава исходных смесей и механического давления.

Ключевые слова: электрический разряд, порошок, электрическое сопротивление, давление.

Введение

В современной промышленности все чаще используются методы консолидации порошковых материалов электрическим током с целью сохранения микро- и наноструктур за счет высоких скоростей нагрева. При этом важную роль играет электрическое сопротивление порошковой композиции: высокое сопротивление затрудняет протекание тока, в результате чего происходит неравномерный прогрев образца и нарушение его целостности. Электрическое сопротивление порошков металлов зависит от состава, размеров и формы частиц порошка [1, 2]. Так, большое количество крупных частиц сферической или осколочной формы приводит к уменьшению поверхности контакта и увеличению электрического сопротивления. Уменьшить электросопротивление можно, изменяя дисперсность и форму частиц порошка, а также удаляя с его поверхности оксидные пленки. Одним из методов, позволяющих изменять размеры, форму, а также влиять на фазовый состав смесей, является применение высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в жидкости [3, 4].

Цель настоящей работы — исследовать влияние ВЭР на электрическое сопротивление порошковых композиций на основе Fe—Ti—C и Fe—Ti—B—C.

Объекты и методы исследования

Исследовали смеси порошков составов 75%Fe+25%Ti и 75%Fe+20%Ti+5%B₄C*. Порошки были обработаны ВЭР в керосине при постоянной общей энергии обработки 1 МДж и варьировании запасаемой энергией единичного разряда W_1 в диапазоне 0,25—1 кДж (количество энергии, запасенной в емкостном накопителе и выделенной в рабочей среде при одном разряде из серии). При изменении запасаемой энергии, соответственно, изменялось количество циклов воздействия с целью сохранения

*Здесь и далее составы смесей приведены в % (мас.).

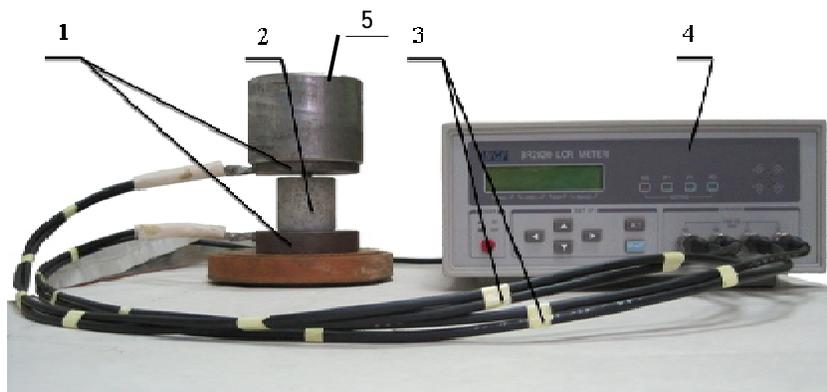


Рис. 1. Стенд для определения сопротивления порошков: 1 — пуансон-контакты; 2 — диэлектрическая ячейка; 3 — коммутационные кабели; 4 — прибор MCP "BR 2820" LCR METER; 5 — груз, обеспечивающий давление 0,6 МПа.

общей энергии обработки. Увеличение запасаемой энергии приводит к росту температуры плазмы в канале разряда, диаметра канала разряда, мощности гидротоков и амплитуды давления волн сжатия-растяжения [5]. Как показано в работах [6, 7], увеличение запасаемой энергии вызывает возрастание интенсивности диспергирования и фазовых превращений.

Для определения электрического сопротивления собран экспериментальный стенд (рис. 1) на основе прибора MCP "BR 2820" LCR METER. Порошок засыпали в диэлектрическую ячейку, которую помещали в пресс (на рисунке не показан) и проводили циклическое нагружение образцов. Количество циклов составляло не менее трех, давление нагрузки каждой серии циклов варьировалось от 0,6 до 60 МПа. Масса порошковой засыпки составляла 3 г.

Чтобы нивелировать влияние переходных сопротивлений на результаты опыта, сопротивление системы пуансон-контактов измеряли при непосредственном механическом контакте верхнего и нижнего пуансон-контактов.

Результаты экспериментальных исследований

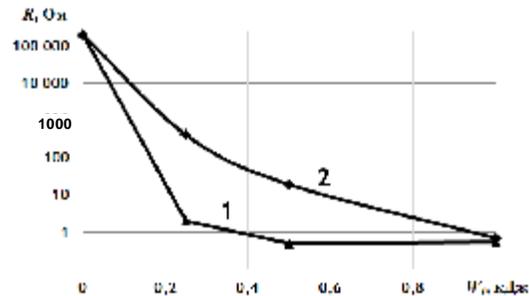
Результаты измерения электрического сопротивления смесей изучаемых составов до и после обработки ВЭР приведены в таблице. Анализ полученных результатов показал, что состав смеси значительно влияет на электрическое сопротивление порошка. При давлении свободной засыпки 0,6 МПа электрическое сопротивление исходной смеси 75% Fe + 25% Ti имеет значение ~120 кОм (рис. 2, кривая 1). Добавка 5% В₄С, который является полупроводником, способствует увеличению электросопротивления почти в 2 раза — ~200 кОм (рис. 2, кривая 2).

В работах [6, 7] установлено, что электроразрядная обработка смесей в керосине приводит к изменению их фазового состава: в смеси 75% Fe + 25% Ti образуются карбиды титана, а в смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С — карбиды и бориды титана, электрическая проводимость которых значительно выше, чем у чистого титана и карбида бора [8]. Такие изменения фазового состава порошков в результате ВЭР обуславливают уменьшение

**Электрическое сопротивление изучаемых смесей
до и после обработки ВЭР**

Запасаемая энергия W_1 , кДж	Электрическое сопротивление R (Ом) при различных давлениях (МПа)					
	0,6	6	13	34	48	60
75% Fe + 25% Ti						
Исходная смесь	127 000, 0	2,9	0,220	0,085	0,038	0,024
0,25	1,461	0,066	0,011	0,005	0,001	<0,001
0,5	0,4	0,024	0,005	0,001	<0,001	<0,001
1	0,391	0,029	0,006	<0,001	<0,001	<0,001
75% Fe + 20% Ti + 5% В ₄ С						
Исходная смесь	202 000, 0	13,0	0,708	0,221	0,100	0,056
0,25	411,0	1,055	0,100	0,044	0,022	0,013
0,5	19,0	0,278	0,052	0,013	0,013	0,012
1	0,697	0,034	0,009	0,002	<0,001	<0,001

Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления R порошковых смесей 75% Fe + 25% Ti (1) и 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С (2) от запасаемой энергии разряда W_1 после электроразрядной обработки в керосине при давлении 0,6 МПа.



электрического сопротивления. Так, обработка с $W_1 = 0,25$ кДж приводит к уменьшению электрического сопротивления смеси 75% Fe + 25% Ti на 5 порядков до ~1,5 Ом. В то же время в смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С после обработки в таком же режиме остается некоторое количество карбида бора, что вызывает меньшее снижение сопротивления, которое уменьшилось на 3 порядка, — ~400 Ом.

Увеличение запасаемой энергии разряда до 0,5 кДж при электроразрядной обработке смесей приводит к дальнейшему измельчению порошков и увеличению количества частиц с высокой электрической проводимостью (TiC, TiB, TiB₂). Электрическое сопротивление смеси 75% Fe + 25% Ti после обработки составляет ~0,4 Ом, а смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С — ~19 Ом. Данные рентгенофазового анализа [6] свидетельствуют о том, что в смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С при обработке ВЭР с энергией 0,5 кДж еще присутствует некоторое количество частиц В₄С.

Обработка ВЭР с $W_1 = 1$ кДж смесей 75% Fe + 25% Ti и 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С обеспечивает близкие значения электрического сопротивления (~0,4 и ~0,7 мОм соответственно), что обусловлено высокой степенью измельчения порошков, карбидизацией титана, а также распадом карбида бора в смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С с образованием боридов титана. При этом данные рентгенофазового анализа [6] показали, что после обработки смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С в этом режиме в ней не наблюдается частиц В₄С. Поскольку проводимость боридов титана превышает таковую карбида титана, то следовало ожидать, что сопротивление смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С после обработки с $W_1 = 1$ кДж будет меньше сопротивления смеси 75% Fe + 25% Ti. Однако значения их сопротивлений близки, что можно объяснить наличием в смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С избыточного углерода, образовавшегося вследствие распада карбида бора, и меньшей концентрацией титана, с которым образованный в процессе пиролиза углеводородной жидкости наночастицы углерода вступают в реакции карбидизации.

По данным таблицы, увеличение механического давления приводит к резкому снижению электрического сопротивления порошков. Так, электросопротивление исходного порошка 75% Fe + 25% Ti уменьшается с ~120 кОм до ~0,2 Ом при 30 МПа и до ~0,02 Ом при 60 МПа, а смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С — с ~200 кОм до ~0,7 Ом при 30 МПа и до ~0,05 Ом при 60 МПа, что обусловлено увеличением площади контактов между частицами. Такая тенденция наблюдается и для обработанных смесей. При механическом давлении 60 МПа электрическое сопротивление смеси 75% Fe + 25% Ti, обработанной при 0,25 Дж, на 3 порядка меньше, чем при давлении 0,6 МПа, и в 20 раз меньше, чем у исходной смеси при давлении 60 МПа. Для смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С, обработанной при 0,25 Дж, — на 6 порядков меньше, чем при давлении 0,6 МПа, и в 50 раз меньше, чем у исходной смеси при давлении 60 МПа. Подобная тенденция сохраняется и после обработок с запасаемой энергией 0,5 и 1 кДж.

При воздействии механического давления влияние состава смесей после обработок ВЭР на электрическое сопротивление сохраняется. Так, после обработки ВЭР во всех режимах электрическое сопротивление смеси 75% Fe + 25% Ti при давлении 60 МПа составляет менее 0,001 Ом, что в 20 раз меньше электрического сопротивления исходной смеси. Такое изменение обусловлено образованием карбида титана высокой электрической проводимости. С увеличением запасаемой энергии обработки ВЭР W_1 от 0,25 до 1 кДж электрическое сопротивление смеси исходного состава 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С при давлении 60 МПа изменяется с 0,013 до <0,001 Ом, что вызвано разложением В₄С и образованием TiC, TiB, TiB₂ высокой проводимости. Это более чем в 50 раз ниже, чем у смеси 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С при том же давлении.

Выводы

Установлено, что состав исследуемых смесей оказывает существенное влияние на электрическое сопротивление. Наличие в смеси 75% Fe + 20% Ti порошка В₄С (5%), который является полупроводником, приводит к увеличению электрического сопротивления с ~120 до ~200 кОм.

Обработка в керосине ВЭР смесей порошков 75% Fe + 25% Ti и 75% Fe + 20% Ti + 5% В₄С при постоянной общей энергии обработки и

изменяющейся от 0,25 до 1 кДж запасаемой энергии обеспечивает снижение электрического сопротивления с ~120 и ~200 кОм до ~1,5 и ~400 Ом при $W_1 = 0,25$ кДж и до ~0,4 и ~0,7 мОм при $W_1 = 1$ кДж соответственно вследствие изменения их фазового состава и дисперсности.

Увеличение механического давления от 0,6 до 60 МПа вызывает снижение электрического сопротивления исследуемых порошков, но тенденция влияния карбида бора сохраняется. Установлено, что обработка ВЭР исследуемых смесей при $W_1 = 1$ кДж приводит к тому, что при давлении более 40 МПа состав исходной смеси не влияет на электрическое сопротивление.

Анализ данных измерения электрического сопротивления порошковых смесей позволяет выбирать оптимальные характеристики консолидации электрическим током в зависимости от начального давления.

1. Гершензон Е. М. Электродинамика / Е. М. Гершензон, Н. Н. Малов, А. Н. Мансуров. — М. : Академия, 2002.
2. Пелецкий В. Э. Электрическое сопротивление тугоплавких металлов : (Справ. под ред. акад. А. Е. Шейндлина) / В. Э. Пелецкий, Э. А. Бельская. — М. : Энергоиздат, 1981. — 96 с.
3. Курец, В. И. Электроимпульсная дезинтеграция материалов / В. И. Курец, А. Ф. Усов, В. А. Цукерман. — Апатиты : Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. — 324 с.
4. Сизоненко О. Н. Влияние высоковольтного электрического разряда на изменение композиции поверхности дисперсных порошков $60\text{Fe}50\text{TiC}$ и свойств спеченных материалов / О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. И. Райченко // Вестник Национального технического университета "ХПИ" : Сб. науч. тр.: Тем. вып. № 39 "Техника и электрофизика высоких напряжений". — Харьков, 2009. — С. 177—184.
5. Наугольных К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. — М. : Наука, 1971. — 155 с.
6. Сизоненко О. Н. Изменение дисперсности порошка $\text{Fe—Ti—V}_2\text{C}$ под воздействием высоковольтного электрического разряда / [О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. И. Райченко и др.] // Порошковая металлургия. — 2012. — № 3/4. — С. 3—12.
7. Сизоненко О. Н. Особенности структурных и физико-химических превращений, инициируемых высоковольтными электрическими разрядами в композиции порошков Fe—Ti—C / [О. Н. Сизоненко, Г. А. Баглюк, А. А. Мамонова и др.] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2012. — С. 162—170.
8. CRC Materials Science and Engineering Handbook / Ed. by J. F. Shackelford, W. Alexander. — Boca Raton : CRC Press LLC, 2001. — 1928 p.

Вплив високовольтної обробки порошкових композицій Fe—Ti—C та Fe—Ti—V—C на їх електричний опір

О. М. Сизоненко, Е. І. Тафтаї, М. С. Присташ, А. Д. Зайченко,
А. С. Торпаков

Вивчено вплив високовольтного електричного розряду на електричний опір порошкових композицій залежно від режиму обробки, а також вплив складу вихідних сумішей та тиску механічного навантаження.

Ключові слова: високовольтний електричний розряд, порошок, електричний опір, тиск.

The impact of high voltage treatment of Fe—Ti—C and Fe—Ti—V—C powder compositions on the changes of their electrical resistivity

O. N. Sizonenko, E. I. Taftai, N. S. Pristash, A. D. Zaichenko, A. S. Torpakov

The impact of high voltage electric discharge on the changes of electrical resistivity of powder compositions depending on processing mode is studied. The influence of initial mixtures composition and mechanical loading on the changes of electrical resistivity values is researched.

Keywords: electric discharge, powder, electrical resistivity, pressure.