

**СТРУКТУРА ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННАЯ
МЕТОДОМ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ**

© 2013

Л.Ю. Лебедева, студент кафедры «Физические проблемы материаловедения»*Е.Г. Григорьев*, кандидат технических наук*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва (Россия)*

ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных методов производства новых материалов

Е.А. Олевский, профессор,

заведующий лабораторией электромагнитных методов производства новых материалов

*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва (Россия)**Государственный Университет Сан-Диего, Сан-Диего (США)***Ключевые слова:** электроимпульсное спекание; цирконий; порошковые материалы.**Аннотация:** Проведено исследование структуры и свойств образцов из сплава Zr+1 %Nb, полученных методом высоковольтной электроимпульсной консолидации порошков, в зависимости от формы частиц (сферической или чешуйчатой). Изучено влияние величины механического давления на проводимость порошков. Также рассмотрено влияние амплитуды импульса тока на конечную плотность полученных образцов для различных величин прикладываемого давления.**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время интенсивно развиваются электроимпульсные методы спекания порошков, принцип которых заключается в совместном воздействии на материал мощного электрического разряда и механического давления. Эти методы можно отнести к высокоэффективным методам консолидации. Их главное преимущество состоит в возможности изменения параметров воздействия на спекаемый порошок, таких как амплитуда, длительность, форма импульса электрического тока в широких диапазонах, размер которых определяется возможностями экспериментального оборудования. Другим неоспоримым достоинством этих методов является возможность получения консолидированных образцов высокого качества при низкой себестоимости. Уникальные возможности электроимпульсной консолидации порошковых материалов нашли свое отражение в неуклонно растущем количестве научных публикаций. Методы электроконсолидации могут быть разделены на две основные группы [1]:

- 1) с помощью низковольтного источника тока [2] (напряжение порядка десятков вольт и ток порядка тысяч ампер) – так называемое спекание сопротивлением;
- 2) с помощью высоковольтного источника питания; высоковольтный конденсатор разряжается через порошковый образец (напряжение порядка десятков киловольт и ток порядка сотни тысяч ампер) – высоковольтное электро-разрядное спекание (ВЭС).

Отличительными чертами метода ВЭС являются высокая скорость нагрева, низкие температуры консолидации, короткая продолжительность процесса консолидации. Преимущества метода полностью проявляются при оптимальных параметрах процесса. Интенсивное электротермическое воздействие на порошковый материал может приводить к образованию неоднородной структуры материала, неустойчивости процесса консолидации и даже к разрушению спекаемого образца и выходу из строя промышленного оборудования. Оптимальные параметры процесса высоковольтной консолидации существенно зависят от исходных свойств спекаемых порошков и, в частности, от проводимости порошков металлов и сплавов при воздействии на об-

разцы механического давления. В свою очередь, проводимость металлических порошков сильно зависит от распределения частиц порошка по размерам. Таким образом, необходимо знать какое влияние оказывают размеры и форма частиц порошка на закономерности процесса ВЭС.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ

Порошковый образец представляет собой стержень круглого сечения диаметром 13,7 мм и высотой до 80 мм. Порошок засыпается в не проводящую электрический ток керамическую матрицу. Чтобы обеспечить резистивный нагрев с помощью эффекта Джоуля, метод ВЭС использует прохождение импульса электрического тока через порошок. Джоулев нагрев происходит на межчастичных контактах, мгновенно «сваривая» частицы порошка, что в результате обеспечивает уплотнение.

Измерение плотности после ВЭС проводилось с использованием принципа Архимеда в дистиллированной воде. Торцы и боковые поверхности консолидированных порошковых компактов были отполированы для наблюдения микроструктуры с помощью оптического микроскопа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента было установлено, что проводимость и усадка образца монотонно возрастают в течение 1–2 минут после приложения давления. В нашем случае перед измерением электропроводности давление прикладывали в течение двух минут. На рис. 1. показана графическая зависимость проводимости порошков сферической и чешуйчатой форм от величины внешнего давления. На рис. 2. и 3. показано влияние величины импульса тока на результирующую плотность консолидированных образцов после ВЭС при различных давлениях.

ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые 1 и 2 рисунка 1 указывают на то, что при величине давления менее 60 МПа частицы сферической и чешуйчатой форм упруго деформируются. Рисунок также показывает, что проводимость порошка

с частицами чешуйчатой формы меняется при увеличении давления с 60 МПа. При более высоком давлении этот образец начинает пластически деформироваться и разрушаться (кривая 1). Характер зависимости для порошка с частицами сферической формы (кривая 2) более плавный, в диапазоне давлений 0–350 МПа проводимость монотонно возрастает. В диапазоне давлений 250–350 МПа проводимость порошков сферической и чешуйчатой форм практически одинакова.

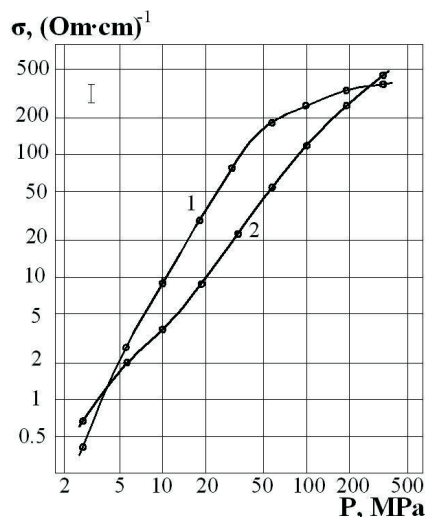


Рис. 1. Зависимость электропроводности порошка (сплав Zr+1 %Nb) от давления 1 – чешуйчатая форма частиц, 2 – сферическая форма частиц

Экспериментальная зависимость плотности спеченных образцов от величины импульса тока для частиц чешуйчатой формы имеет вид параболы с максимумом при оптимальных плотностях тока (рис. 2).

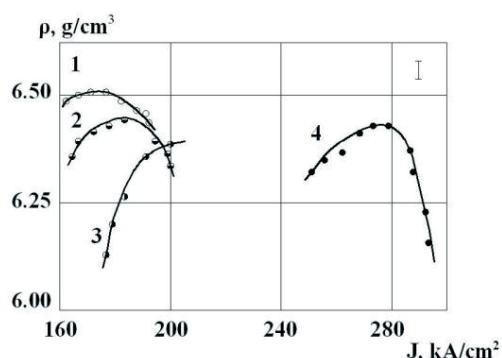


Рис. 2. Влияние величины импульса тока на результирующую плотность спеченных образцов с частицами чешуйчатой формы после ВЭС

С увеличением амплитуды импульса тока плотность консолидированных образцов увеличивается до некоторого максимального значения в зависимости от при-

ложенного давления, а с дальнейшим ростом амплитуды импульса тока их плотность значительно снижается. Максимальная плотность образцов приблизительно равна 180 кА/см² при давлениях 165 МПа и 190 МПа (кривые 1 и 2 на рис. 2). При давлении 307 МПа максимальная плотность составила 280 кА/см² (кривая 4 на рис. 2). Различные положения максимумов плотности консолидированных образцов (кривые 1, 2 и 4) указывают на значительное влияние трения на поверхности матрицы на процесс уплотнения порошка.

На рисунке 3 приведена экспериментальная зависимость образцов сплава Zr+1 %Nb с частицами сферической формы от амплитуды импульса тока для различных величин давления.

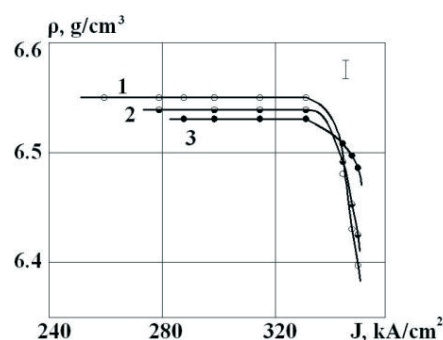


Рис. 3. Влияние величины импульса тока на результирующую плотность спеченных образцов с частицами сферической формы после ВЭС

Из рисунка можно увидеть, что плотность консолидированных образцов в диапазоне плотностей токов от 260 кА/см² до 340 кА/см² постоянна для давлений от 250 до 350 МПа. Когда плотность импульса тока превышает 340 кА/см², плотность консолидированных образцов резко уменьшается. В этом случае, процесс компактирования порошковых образцов методом ВЭС становится нестабильным и возможен выброс консолидированного материала в пресс-оснастку. Причина нестабильности процесса уплотнения порошка методом ВЭС была рассмотрена в работе [3]. Установлено, что нестабильность в ходе процесса происходит из-за кумулятивного характера схлопывания межчастичных пор.

Наиболее важными факторами, определяющими результат ВЭС-процесса, являются приложенное давление и амплитуда импульса тока в порошковом образце. Следует отметить, что для получения одинаковой степени уплотнения частиц различной морфологии необходимы разные величины давления.

ВЫВОДЫ

Порошки циркониевого сплава (Zr+1 %Nb) с частицами сферической и чешуйчатой форм были получены методом ВЭС. Показано, что температура порошкового образца в процессе консолидации зависит от проводимости порошкового материала: с увеличением давления температура уменьшается.

В работе была изучена экспериментальная зависимость проводимости порошков с частицами сфериче-

ской и чешуйчатой форм от величины давления. Характер поведения частиц при спекании определяется контактным взаимодействием. Для частиц порошка чешуйчатой формы при давлениях меньших 200 МПа идет процесс переупаковки. Частицы более плотно прилегают друг к другу, проводимость порошка увеличивается. Для частиц сферической формы переупаковка существенно меньше, поэтому проводимость растет монотонно. Влияние амплитуды импульса тока на конечную плотность консолидированных порошков циркониевого сплава было рассмотрено для различных давлений.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ № 11.G34.31.0051.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ortu R., Licheri R., Locci A. M., Cincotti A., Cao G. Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering // *Materials Science and Engineering*. 2009. R. 63. P. 127–287.
2. Чувильдеев В.Н., Москвичева А.В., Баранов Г.В. Сверхпрочные нанодисперсные вольфрамовые псевдосплавы, полученные методом механоактивации и электроимпульсного плазменного спекания // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. В. 22. С. 23–32.
3. Grigoryev E. High Voltage Electric Discharge Consolidation of Tungsten Carbide - Cobalt Powder. Rijeka, Croatia: InTech, Janeza Trdine. 2011. P. 345.

STRUCTURE OF ZIRCONIUM ALLOY CONSOLIDATED BY HIGH VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE CONSOLIDATION

© 2013

L.Y. Lebedeva, student of the Department of Materials Science

E.G. Grigoryev, candidate of technical sciences,

leading researcher Key Laboratory for Electromagnetic Field Assisted Materials Processing

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow (Russia)

E.A. Olevsky, Ph.D, head of the Key Laboratory for Electromagnetic Field Assisted Materials Processing

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow (Russia)

San Diego State University, San Diego (USA)

Keywords: process high voltage electric discharge consolidation; zirconium alloy; powder materials.

Annotation: We have studied the structure and the properties of the samples of an alloy Zr+1 % Nb, obtained by high-voltage electro-consolidation, in relation to the different forms of particles of the powders (flake and spherical particles). The impact of mechanical pressure on the value of the conductivity of the powders was studied. Apart from the above mentioned, the influence of current pulse amplitude on the final density of the consolidated zirconium powder alloy samples was investigated for different applied pressures.