

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ СИСТЕМЫ Al-Ti НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ МОРФОЛОГИИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА

**м.н.с. Торпаков А. С.¹, д.т.н., проф. О. Н. Сизоненко¹, м.н.с. Е. В. Липян¹,
к.т.н., инж. 1 кат. Е. В. Солодкий²**

¹Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины

E-mail: torpakov@gmail.com

²Национальный технический университет Украины «КПИ» им. И. Сикорского, инженерно-физический факультет, кафедра высокотемпературных материалов и порошковой металлургии

E-mail: evgen.solodky@gmail.com

В работе экспериментально исследованы изменения дисперсности, фактора формы и фазового состава порошковых смесей массового состава 75 % Ti + 25 % Al; 50 % Ti + 50 % Al; 25 % Ti + 75 % Al после обработки высоковольтным электрическим разрядом в керосине. Установлены закономерности их диспергирования и синтеза TiC, AlTi₃, AlTi, Al₂Ti, Al₃Ti, двойного карбида Ti₃AlC, МАХ-фаз Ti₃AlC₂ и Ti₂AlC, лонсдейлита.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для развития аэрокосмической отрасли необходимо создание новых высокоизносостойких дисперсноупрочненных наночастицами композиционных материалов на основе системы Ti – Al, имеющих повышенные физико-механические и эксплуатационные характеристики для работы в экстремальных условиях.

Свойства материалов, полученных методами порошковой металлургии, во многом определяются дисперсностью и фазовым составом исходной порошковой шихты [1]. Известно, что для подготовки шихты для металоматричных композитов (ММК) используются механические и физические методы, из которых является высоковольтный электрический разряд (ВЭР) [2, 3]. ВЭР в дисперсных системах «углеводородная жидкость – порошок» вызывает деструкцию молекул углеводородов в канале ВЭР и микроплазменных каналах между частицами порошка, а образующиеся при этом частицы наноглерода взаимодействуют с частицами обрабатываемого порошка, в результате чего синтезируются дисперсноупрочняющие карбидные фазы [4, 5].

Целью данной работы является исследование изменения морфологии и фазового состава порошковых смесей Al-Ti после ВЭР обработки.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

ВЭР обработке в керосине подвергались смеси порошковых систем Ti – Al в следующих массовых соотношениях: 75 % Ti + 25 % Al; 50 % Ti + 50 % Al; 25 % Ti + 75 % Al. Выбор процентного соотношения Ti и Al был обоснован необходимостью подготовки шихты для получения алюмоматричных композитов 25 % Ti + 75 % Al и 50 % Ti + 50 % Al и титановых наноламинатов (МАХ-соединений) 75 % Ti + 25 % Al. Исследования выполнялись на экспериментальном стенде, подробно описанном в [2]. Обработка всех рассмотренных порошковых смесей производилась при энергии единичного разряда $W_1 = 0,5$ кДж и варьировании удельной энергии обработки, обеспечивающей синтез наноглерода в количестве, необходимом для синтеза высокомолекулярных наполнителей и МАХ-фаз согласно [2, 3, 4, 5, 6]. Для состава 25 % Ti + 75 % Al значение удельной энергии обработки составляло 3,33 МДж/кг, для состава 50 % Ti + 50 % Al – 6,66 МДж/кг, для состава 75 % Ti + 25 % Al – 10 МДж/кг.

В экспериментах были использованы два основных типа электродной системы – острие – плоскость и многоострый анод – плоскость в двух различных вариациях (3-х и 15-ти острыйная, см. рис. 1). Как было показано в работе [7], посредством изменения конструкции электродной системы (ЭС) с острие – плоскость на многоострый анод – плоскость предоставляется возможность управления распределением плазменных образований в объеме обрабатываемого порошка, что способствует интенсификации процессов эрозионного и гидродинамического диспергирования и синтеза химических соединений при ВЭР обработке.

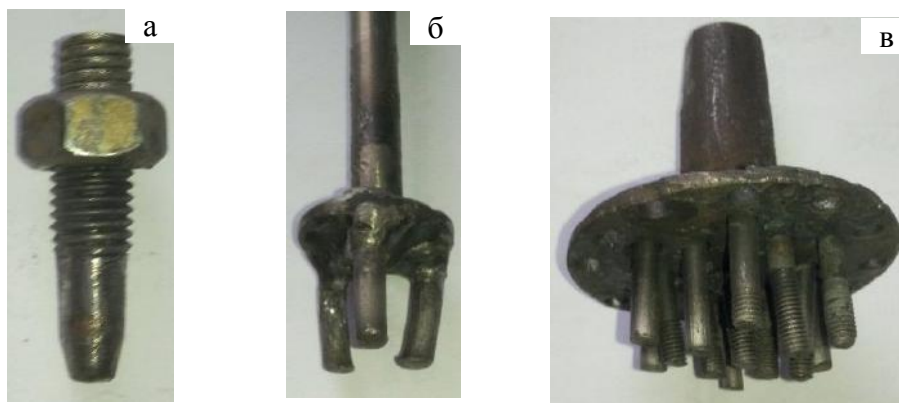


Рис. 1. Внешний вид сменных анодов ЭС, использованных при выполнении работы:
а – острое – плоскость; б – 3-х острийный вариант ЭС; в – 15-ти острийный вариант ЭС

В процессе исследований регистрировались осциллограммы разрядного тока и напряжения, которые переносились на компьютер, где с помощью программного обеспечения MathCAD 14 рассчитывались электрические и гидродинамические характеристики разряда (в частности, средняя скорость нарастания тока и амплитуда волны давления), согласно методик, изложенных в [2]. В выбранном режиме обработки скорость нарастания тока находилась в диапазоне от 8 до 14 ГА/с, а амплитуда волны давления на стенке разрядной камеры составляла порядка 100 МПа.

Порошки исследовались до и после ВЭР обработки. Методики исследования размера и морфологии порошков подробно представлены в работе [2]. В исследованиях использовалось следующее оборудование и программное обеспечение (ПО) – микроскоп оптический БИОЛАМ-И, с максимальным увеличением $\times 1350$, растровый электронный микроскоп РЕММА-102 с диапазоном увеличений от $\times 10$ до $\times 250000$, сканирующий электронный микроскоп EVO-50 производства фирмы Carl Zeiss (Германия) с диапазоном увеличений от $\times 5$ до $\times 1000000$, цифровая фотокамера Canon. После получения четкого изображения фиксировалось увеличение, и делались фотоснимки, которые обрабатывались с помощью Adobe Photoshop CS3 для дальнейшего анализа с помощью ПО Image-Pro Plus 6.0, что позволило построить дифференциальное распределение частиц исследуемых порошков по размерам. Рентгенофазовый анализ порошков до и после обработки проводили на рентгеновских дифрактометрах Bruker D8 DISCOVER, Rigaku Ultima IV, а также ДРОН-3 в Cu-K_α излучении. При идентификации фаз использовали программное обеспечение Bruker: EVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ВЭР обработка при всех исследованных режимах и схемах воздействия приводит к диспергированию частиц обработанных смесей (см. рис. 2). При этом распределение частиц по размерам после ВЭР обработки из мономодального становится бимодальным. Использование 3-х острийной ЭС для ВЭР-обработки смесей состава 25 % Ti + 75 % Al с удельной энергией 3,33 МДж/кг и 50 % Ti + 50 % Al с удельной энергией, увеличенной до 6,66 МДж/кг позволяет получить лучшие с точки зрения диспергирования результаты, чем для одноострийной и 15-ти острийной ЭС (см. рис. 2.39, а, б). При этом основной пик распределений частиц порошковых смесей 25 % Ti + 75 % Al и 50 % Ti + 50 % Al по размерам смещается в точку ~ 3 мкм и составляет ~ 64 %, а порядка 30 % частиц имеют размеры менее 1 мкм. При обработке смеси состава 75 % Ti + 25 % Al с удельной энергией 10 МДж/кг основной пик распределения по размерам при этом смещается в точку ~ 3 мкм, ~ 51 %, а порядка 20 % частиц имеют размеры менее 1 мкм.

Наибольшее количество исходных частиц (~ 40 %) для всех исследованных смесей системы Ti – Al имело губчатую форму, а ВЭР обработка с использованием одноострийной ЭС для всех рассмотренных смесей приводит к росту количества частиц осколочной формы и снижению количества частиц сферической формы, что может быть связано, на наш взгляд с преимущественно гидродинамическим воздействием ВЭР.

Использование 3-х острийной ЭС во всех рассмотренных случаях приводит к росту количества частиц сферической формы на ~ 5 %, что может быть связано с усилением токовых процессов, которые приводят к электроэрозии частиц в процессе ВЭР обработки. Использование 15-ти острийной ЭС не оказывает существенного влияния на форму частиц.

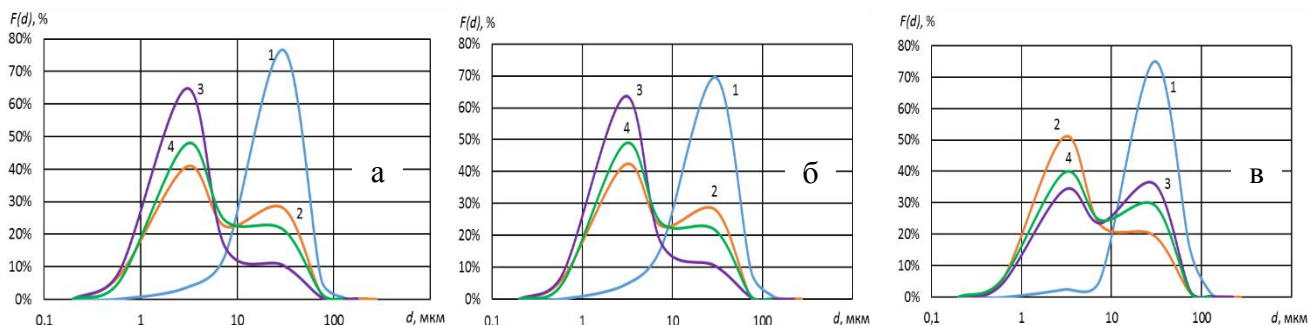


Рис. 2. Распределения частиц порошковых смесей системы $Ti - Al$ по размерам: 1 – исходная смесь; 2 – одноострыйная ЭС, 3 – 3-х острыйная ЭС; 4 – 15-ти острыйная ЭС; а – 25 % Ti + 75 % Al (3,33 МДж/кг); б – 50 % Ti + 50 % Al (6,66 МДж/кг); в – 75 % Ti + 25 % Al (10 МДж/кг)

Рентгенофазовые исследования всех исходных смесей показали наличие пиков титана и алюминия (см. рис. 3, а). Изменение дисперсности и формы частиц после ВЭР обработки сопровождается изменением фазового состава. В частности, при ВЭР-обработке смеси порошков 75% Ti + 25% Al с 3-х остройной ЭС (см. рис. 3, б) происходит синтез таких соединений, как TiC , $AlTi_3$, $AlTi$, Al_2Ti , Al_3Ti , двойного карбида Ti_3AlC , МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC , лонсдейлита.

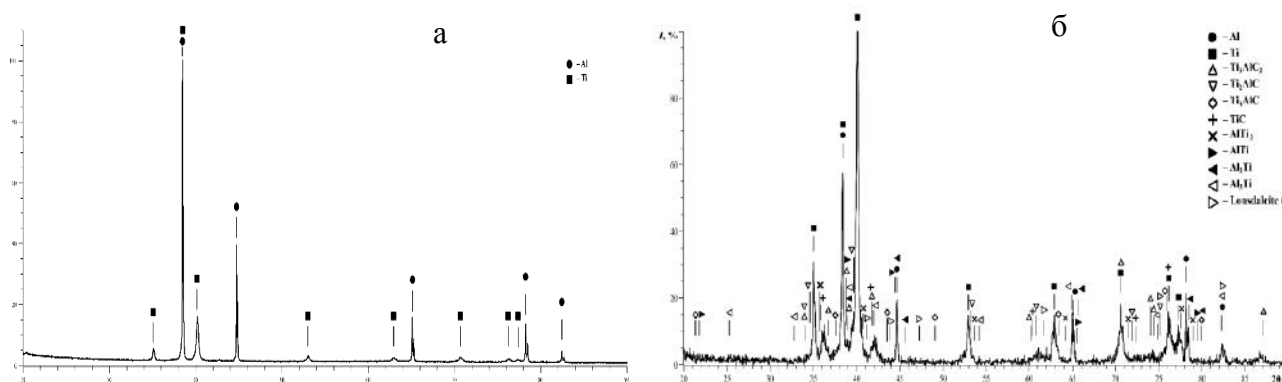


Рис. 3. Дифрактограммы порошковой смеси состава 75 % Ti + 25 % Al : а – в исходном состоянии; б – после ВЭР-обработки при $W_{y0} = 10$ МДж/кг, трехострийная электродная система

Шихта, обработанная с использованием 15-ти остройной ЭС, содержит меньшее количество интерметаллидов, карбида титана и МАХ-фаз. Смесь порошков, которая подверглась обработке с одноострийной системой имеет наименьшее количество новообразованных соединений и наиболее близка к исходному составу.

ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что ВЭР-обработка порошковых систем $Ti - Al$: 75 % Ti + 25 % Al ; 50 % Ti + 50 % Al ; 25 % Ti + 75 % Al в керосине приводит к их диспергированию, при этом основной пик распределения по размерам смещается в точку ~ 3 мкм, а не менее 20 % частиц имеют размеры менее 1 мкм.

Показана возможность управления эффективностью воздействия различных факторов ВЭР воздействия на систему порошков $Ti - Al$ с целью целенаправленного синтеза дисперсноупрочняющих составляющих (карбида титана TiC , интерметаллидов $AlTi_3$, $AlTi$, Al_2Ti , Al_3Ti , Ti_3AlC , МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_2AlC и лонсдейлита) путем изменения конфигурации электрического поля за счет использования различных типов ЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский, Р. А. Порошковое материаловедение / Р. А. Андриевский. – М.: Металлургия, 1991. – 205 с.
2. Plasma technologies for obtainment of composite materials dispersion hardened by nanostructured particles / O. Sizonenko, V. Tregub, N. Pristash, A. Zaichenko, A. Torpakov // Machines, Technologies, Materials. – 2015. – Issue 1. – P. 32–35. – ISSN 1313-0226.
3. High voltage electric discharge in liquid as a method of preparation of blend for carbide steels / O. N. Sizonenko, E. G. Grigoriev, A. D. Zaichenko, A. S. Torpakov, E. V. Lipyanyan, N. S. Pristash, V. A. Tregub // Machines, Technologies, Materials. – 2013. – Issue 10. – P. 19–22. – ISSN 1313-0226
4. Dispersion and carburization of titanium powders by electric discharge / O. N. Sizonenko, G. A. Baglyuk, E. I. Taftai, A. D. Zaichenko, E. V. Lipyanyan, A. S. Torpakov, A. A. Zhdanov, N. S. Pristash // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52, Issue 5/6. – P. 247–253. – ISSN 1068-1302.
5. Пат. 97890 Україна, МПК (2012.01) C01B 31/30 (2006.01), B01J 3/06 (2006.01), B22F 9/14 (2006.01), B82B 3/00. Спосіб одержання карбідів металів перехідної групи / Сизоненко О. М., Тафтай Е. І., Райченко О. І., Баглюк Г. А., Торпаков А. С., Липян Є. В., Зайченко А. Д.; заявник і патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № а201011723; заявл. 01.10.10; опубл. 26.03.12, Бюл. № 6. – 6 с.
6. Zhou W. B. Rapid synthesis of Ti₂AlC by spark plasma sintering technique / W. B. Zhou, B. C. Mei, Q. J. Zhu, X. L. Hong // Materials Letters. – 2005. – Vol. 59. – P.131-134.
7. Сизоненко О. Н. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в слое порошка Ti в керосине / О. Н. Сизоненко, В. А. Трегуб, Э. И. Тафтай // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – 2014. – Випуск 7 – С. 55 – 61.

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта НАН Украины научно-исследовательских работ молодых ученых в 2016 г. (тема № II-18-15, № ГР 0115U003864).