

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ МЕДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ СФЕРОИДИЗАЦИИ

А.В. Смирнов¹, А.Е. Чесноков¹, Т.М. Видюк^{1,2}

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

²*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
630117, Новосибирск, Россия*

Металлические, композиционные и керамические порошки широко используют в технологиях газотермического и газодинамического напыления, аддитивных технологиях, порошковой металлургии и др. Размер, форма и внутренняя структура частиц исходного порошка влияет на физические, механические и химические свойства получаемых покрытий [1]. Предварительное высокоэнергетическое воздействие на исходные частицы, например, при механической обработке порошков в шаровых мельницах планетарного типа, приводит к изменению размера частиц и их формы в зависимости от физических свойств и химического состава материала. Во время механической обработки образуются агломерированные частицы, характеризующиеся слоистой структурой, наличием в своем объеме закрытых микротрещин и микропор; происходит очищение поверхности вследствие разрушения оксидных пленок и адсорбированных слоев и т.д. [2]. Последующая обработка порошков неравноосной формы в плазменной струе позволяет получать частицы сферической формы [3]. Обработка частиц в плазменной струе сопровождается нагревом материала до высоких температур, достаточных для его плавления и протекания реакций синтеза, в результате чего появляется возможность получения металлокерамических сферических, в том числе полых частиц [4]. В работе [5] показан метод получения плотных сферических частиц титана декамикронного размера при плазменной обработке агломерированных ультрадисперсных частиц, имеющих высокую открытую пористость. Добавление в исходный порошок 10 вес.% наночастиц нитрида титана приводит к формированию частиц с распределенными газовыми включениями по объему. В данной работе исследуется влияние условий механической обработки медного порошка и последующей его плазменной сфероидизации на гранулометрический состав, морфологию поверхности, внутреннюю структуру и фазовый состав получаемых частиц.

При механической обработке сначала происходит диспергирование исходных частиц меди, что приводит к увеличению их удельной поверхности. Затем, в силу высокой поверхностной активности, ультрадисперсные частицы образуют агломераты, имеющие слоистую структуру [2]. При взаимодействии мелющего тела с частицей кинетическая энергия расходуется на пластическую деформацию частицы с выделением большого количества тепла, вплоть до 95%, поскольку температура в контакте может достигать температуры плавления материалов. Увеличение времени механической обработки приводит к росту температуры всей системы вплоть до температуры, близкой к температуре плавления обрабатываемого материала. Частицы в таких условиях становятся пластичными и начинают образовывать агломераты; наблюдается процесс гранулирования методом окатывания. Рентгенофазовый анализ механически обработанного порошка показал наличие пиков, соответствующих фазе только меди.

В качестве исходного порошка для плазменной обработки использовали фракцию размером больше 90 мкм механически обработанных частиц в течение

180 секунд (рис. 1, а). В результате обработки порошка меди в плазменной струе получены сферические частицы, морфология которых представлена на рис. 1, б. Поверхность частиц чистая, на ней практически отсутствуют сателлиты, образующиеся в процессе испарения наиболее мелких частиц, с последующей конденсацией паров в виде мелкодисперсных и субмикронных частиц. На поверхности частиц видна структура, образованная в процессе кристаллизации. Средний размер частиц составил $d_{\text{mean}}=24$ мкм, $d_{10}=6$ и $d_{90}=46$ мкм.

Исходные порошки состоят из агломерированных частиц, для которых характерна внутренняя пористость, обусловленная формированием из множества случайно упакованных частиц меди в процессе механической обработки. Их обработка в плазменной струе приводит к образованию либо плотных сферических частиц, либо полых микросфер и микросфер с распределенными газовыми включениями. Реализация того или иного сценария зависит от размера агломератов, их пористости и интенсивности межфазного теплообмена «агломерированная частица – поток плазмы» и времени их пребывания в плазменной струе [4]. Взаимодействие расплавленного материала частицы с локализованными газовыми объемами приводит к его окислению. На рис. 1, в видно распределение мелкодисперсных частиц оксида меди по объему обработанной частицы с размерами включений от десятков нанометров до нескольких микрометров. Рентгенофазовый анализ сфероидизированного порошка показал наличие пиков, соответствующих фазе меди и не более 7 ат.% оксида меди Cu_2O .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №19-19-00335 с использованием с использованием научного оборудования, входящего в состав ЦКП "Механика".

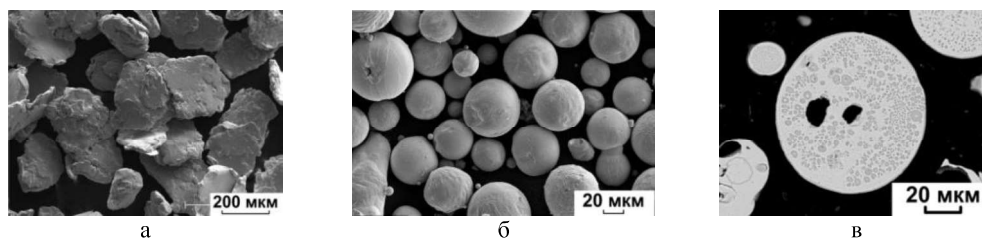


Рис. 1. СЭМ микрофотографии общего вида: (а) механически обработанных в течение 180 секунд частиц меди; (б) сфероидизированных частиц меди и их шлиф (в).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Uliantsky V.Yu., Solonenko O.P., Smirnov A.V., Batraev I.S.** Detonation spraying of hollow microspherical alumina powder. // Proc. Intern. Thermal Spray Conf. 2014. Vol. 3878, P. 668 - 673.
2. **Suryanarayana C.** Mechanical alloying and milling. // Progress in Materials Science. 2001. Vol. 46. P. 1-184.
3. **Grigor'ev A.V., Razumov N.G., Popovich A.A., Samohin A.V.** Plasma spheroidization of powders based on Nb-Si alloys obtained by mechanical doping. // Metallurgy and Materials Science Scientific and technical lists of the St. Petersburg State Polytechnic University. 2017. Vol. 23. P. 247-255
4. **Solonenko O.P., Smirnov A.V., Chesnokov A.E.** Microstructure and morphology of powder particles TiC-NiCr, synthesized in plasma jet, at high-energy actions on components of initial composition Ti-C-NiCr. // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter. 2017. Vol. 1893. P. 030003. DOI: 10.1063/1.5007461
5. **Chesnokov A.E., Smirnov A.V.** Formation of Particle Structure in Plasma Treatment of Granulated Powder Based on Titanium. // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol. 2019. Vol. 12. P. 203-213. DOI: 10.17516/1999-494X-0129.