

05

Плазменная обработка и напыление порошков оксидов металлов, состоящих из полых сфер

© О.П. Солоненко, И.П. Гуляев, А.В. Смирнов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
E-mail: solo@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 8 апреля 2008 г.

Анализируются особенности плазменной обработки агломерированных порошков и напыления порошков, состоящих из полых частиц, на примере диоксида циркония. Показано, что формирование сплэтов (растекшихся и затвердевших на подложке капель расплавов) при соударении полых капель с подложкой, по сравнению с расплавленными плотными частицами той же массы, носит более стабильный характер. Обсуждаются преимущества применения полых порошков для газотермического напыления.

PACS: 81.20.Ev, 81.15.Rs, 81.15.-z

В последнее время отмечается заметный интерес к изучению характеристик термобарьерных покрытий, напыляемых из порошков диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, состоящих из полых частиц, и их сравнению с покрытиями из агломерированных и спеченных порошков [1,2] и др. Однако обеспечить информативность и достоверность такого сравнения проблематично, так как сложно проконтролировать наличие и долю плотных частиц в серийных полых порошках, однородность толщины оболочки полых частиц и т.п.

При плазменном напылении порошка ZrO_2 , состоящего из плотных частиц, основным недостатком является то, что невозможно проконтролировать степень проплавленности частиц вследствие низкого коэффициента теплопроводности материала и различных времен пребывания частиц в плазменной струе („эффект траекторий“). Это приводит к неоднородности агрегатного состояния частиц по сечению пятна напыления и, следовательно, к неоптимальным характеристикам покрытия.

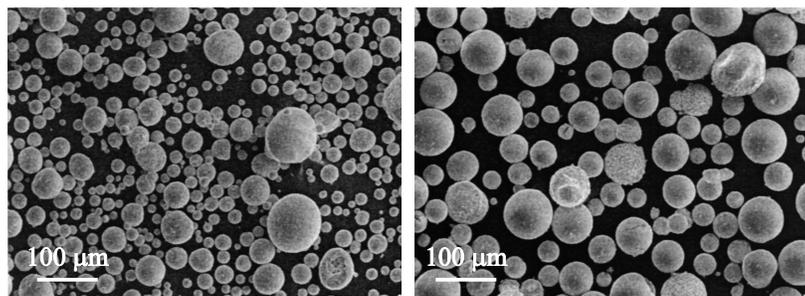


Рис. 1. СЭМ-фотографии порошков ZrO_2 : *a* — обработанный с помощью линейного плазматрона; *b* — обработанный с помощью 2-струйного плазматрона.

При напылении же полых частиц можно гарантировать, что материал оболочки (толщиной $5\text{--}10\ \mu\text{m}$) полностью расплавлен, а температура в ее сечении постоянна, что является существенным аргументом в пользу таких порошков.

Настоящая публикация является продолжением исследований, начатых в работе [3], в которой впервые предпринята попытка изучения формирования сплэтов из одиночных полых капель ZrO_2 при полном контроле ключевых физических параметров (КФП) перед соударением: скорости u_p , температуры T_p , диаметра D_p (радиуса R_p), толщины оболочки каплей Δ_p , температуры подложки T_b и состояния ее поверхности. Модельные эксперименты по формированию сплэтов произведены на установке, описание которой приведено в [3].

Одним из эффективных методов получения полых частиц является плазменная обработка агломерированных порошков, полученных методом распылительной сушки и последующего отжига. На рис. 1 представлены фотографии обработанного агломерированного порошка ZrO_2 , не подвергавшегося предварительному отжигу. При этом рис. 1, *a* отвечает радиальному вводу порошка под срез сопла линейного плазматрона, а рис. 1, *b* — осевой инъекции порошка с расстояния $L_i = 25\ \text{mm}$ от зоны слияния токопроводящих струй двухструйного плазматрона. Тепловая мощность потоков азотной плазмы в обоих случаях была около $45\ \text{kW}$, а расход порошка — около $20\ \text{kg/h}$.

Как видно, в первом случае средний размер обработанных частиц существенно меньше, чем во втором. Прежде всего, причиной этого

являются термонапряжения частиц исходного порошка, вызванные неравномерным термическим расширением агломерата под действием высокой температуры плазменной струи.

Агломерированные частицы исходного порошка ZrO_2 при их радиальном вводе в плазменную струю (случай 1) испытывали значительный термоудар (среднемассовая температура азотной плазмы на срезе сопла используемого плазмотрона составляла примерно 8000 К). Следовательно, исходные частицы могли распадаться на несколько агломератов меньшего размера, которые затем проводили стадию сфероидизации. Во втором же случае частицы до их попадания в зону слияния токопроводящих струй в течение нескольких миллисекунд подвергались достаточно мягкому радиационно-конвективному нагреву. Вследствие этого более вероятно спекание микрочастичек, составляющих агломерированную частицу исходного порошка, которая затем попадает в зону смешения токовых струй — основную зону обработки.

Кроме того, уместно упомянуть, что к разрушению уже сформированных полых капель расплава могут приводить другие два фактора: динамический напор, действующий со стороны несущего газового потока на полую каплю из-за существенного различия в скоростях „частица–плазма“; нагрев газа, находящегося внутри уже образовавшейся полый жидкой частицы, приводящий к увеличению внешнего диаметра, утонению оболочки и ее разрыву.

Следует отметить, что отличительной особенностью высокоскоростного удара полый капли о подложку является адиабатическое сжатие газа, содержащегося в частице. В результате этого на первой стадии соударения нижняя полусферическая оболочка, деформируясь, приходит в контакт с поверхностью подложки, после чего происходит, как правило, разрыв верхней части оболочки вследствие резкого нарастания давления, и она соударяется с растекающейся и затвердевающей жидкой пленкой. На второй стадии происходит ламинарное растекание плоского слоя расплава по подложке. Конечная морфология сплэта зависит от конкретных значений КФП.

Для изучения процесса деформации полых капель ZrO_2 было проведено численное моделирование динамики движения тонкой оболочки частицы под действием сил давления газа внутри капли и поверхностного натяжения. Было найдено, что на стадии деформации газовой полости (вплоть до разрыва) основным параметром, определяющим характер

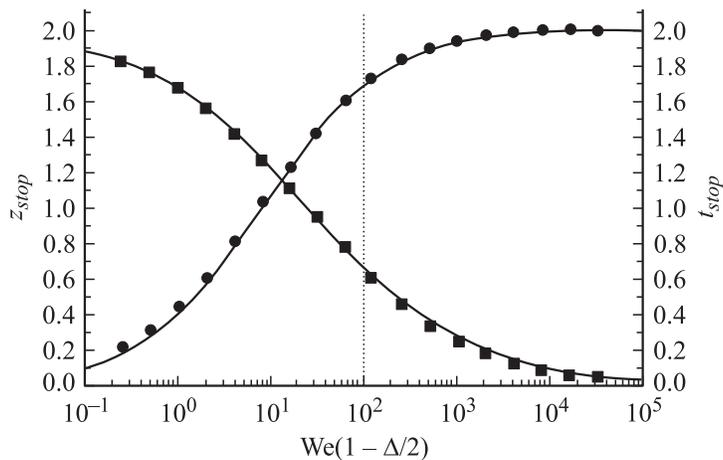


Рис. 2. Зависимость параметров остановки вершины капли от комплекса (1).

сжатия, является безразмерный комплекс

$$\text{We} \left(1 - \frac{\Delta}{2 - \Delta} \right)^{\Delta \leq 0.2} \approx \text{We}(1 - \Delta/2), \quad (1)$$

где в число Вебера $\text{We} = 2\rho R_p u_p^2 / \sigma$ входят: ρ , σ — плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкого ZrO_2 ; $\Delta = \Delta_p / R_p$ — безразмерная толщина оболочки.

Если при деформации полой капли не происходит разрыва оболочки, вершина частицы движется по направлению к основе, затем останавливается и начинает обратное движение. На рис. 2 представлены зависимости минимальной безразмерной высоты вершины (z_{stop}) жидкого купола в момент ее остановки и времени остановки (t_{stop}), отнесенного к характерному времени деформации R_b / u_p , от безразмерного комплекса (1). Пунктирной линией на рис. 2 отделена область значений комплекса (1), отвечающая условиям, реализуемым при плазменном напылении: $\text{We}(1 - \Delta/2) > 10^2$. Очевидно, изменяя значение данного параметра в процессе напыления, можно получать покрытия с существенно различной пористостью.

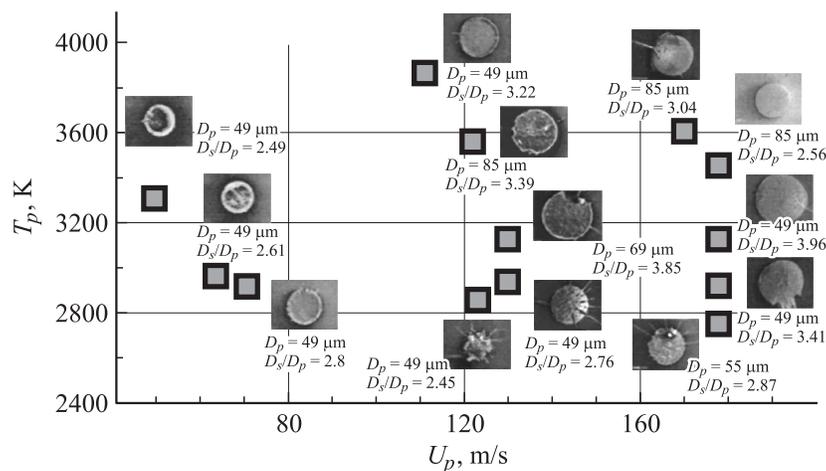


Рис. 3. Карта сплэтов, полученных на подложках из нержавеющей стали ($T_b = 600\text{--}700$ К) при различных скоростях соударения и начальных температурах полых капель ZrO_2 (квадраты).

Как отмечалось выше, после разрыва купола частицы происходит инерционное растекание плоского слоя расплава на подложке. При этом конечная форма и размер сплэта будут определяться силами вязкого трения, поверхностного натяжения и скоростью затвердевания.

В работе [3] было показано существенное различие в формировании сплэтов ZrO_2 при соударении с подложкой полых и эквивалентных плотных жидких сфер, имеющих одинаковые скорости и массы. В частности, безразмерный диаметр сплэта для полых частиц значительно меньше, чем для плотных капель, при прочих равных условиях.

На рис. 3 представлена карта морфологии сплэтов в координатах $u_p\text{--}T_p$. Под каждой фотографией приведены: средний по фракции диаметр частиц и безразмерный диаметр сплэта. Для всех сплэтов толщина стенки составляла $\Delta \approx 0.1 D_p$, температура подложки $T_b = 600\text{--}700$ К. Представленная карта морфологии сплэтов свидетельствует о том, что при превышении температуры в контакте частица–основа над некоторой критической температурой не существует строгой зависимости степени растекания капли от ее начальной температуры. Отношение

D_s/D_p (диаметр сплэта к начальному диаметру частицы) в основном определяется начальной скоростью частицы. При температуре капель, близкой к температуре плавления, одновременно с их деформацией возможно протекание процесса кристаллизации, что может приводить к существенно нерегулярной форме и структуре сплэтов.

В заключение отметим еще раз преимущества порошков, состоящих из полых частиц: пониженные требования к плазмотронам при напылении полых порошков оксидов; возможность получения покрытий с контролируемой в широких пределах пористостью (по-видимому, от 2–3 до 30% и более).

Представленная работа была выполнена при поддержке президиума СО РАН в рамках Программы № 8 президиума РАН на 2006–2007 гг., проект № 6; а также Комплексного интеграционного проекта 2.9 между СО РАН и НАН Украины.

Список литературы

- [1] *Tan Y., Longtin J.P., Sampath S.* // Proc. of Intern. Thermal Spray Conf. Seattle, USA, 15–18 May 2006 (Electronic publication).
- [2] *Ladru A., Reymann H., Mensing M.* et al. // Proc. of Intern. Thermal Spray Conf. Seattle, USA, 15–18 May 2006 (Electronic publication).
- [3] *Solonenko O.P., Mikhalchenko A.A., Kartaev E.V.* // Proc. of Intern. Thermal Spray Conf. Basel, Switzerland, 2–4 May 2005 (Electronic publication).