

концентрацией 3 мас. %, преимущественно содержат SnO_2 . В незначительных количествах присутствуют оксидные фазы переменного состава.

В продуктах электрохимического синтеза при использовании растворов хлорида натрия с концентрацией 25 мас. % превалирует содержание SnO .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pourbaix M. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. — London: Pergamon Press, 1966. — Pt. 2. — 386 p.
2. Шульгин Л.П. Электрохимические процессы на переменном токе. — Л.: Наука, 1974. — 71 с.
3. Францевич И.Н. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита. — Киев: Наукова думка, 1985. — 280 с.
4. Киш Л. Моделирование влияния среды на анодное окисление металлов // Электрохимия. — 2000. — Т. 36. — № 10. — С. 1191–1196.
5. Коробочкин В.В., Ханова Е.А. Определение количества окисленных титана, кадмия и меди при электролизе на переменном токе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2005. — Т. 71. — № 6. — С. 20–23.
6. Коробочкин В.В., Усольцева Н.В., Горлушко Д.А., Балмашнов М.А. Закономерности синтеза нанодисперсных оксидов меди электролизом на переменном токе в растворе щелочи // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 317. — № 3. — С. xx-xx.
7. ASTM Diffraction data cards and alphabetical and grouped numerical index of X-ray diffraction date. Philadelphia, ASTM, 1967.
8. Коробочкин В.В., Ханова Е.А. Исследование состава и параметров пористой структуры продукта окисления металлического олова, полученного электролизом с помощью переменного тока // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 4. — С. 101–104.
9. Долотов Н.И., Зильберман А.Б., Ильин Ю.А., Махин А.В., Мошников В.А., Яськов Д.А. Фазовый анализ тонких пленок олова при окислении на воздухе // Неорганические материалы. — 1994. — Т. 30. — № 1. — С. 83–86.
10. Коробочкин В.В., Косинцев В.И., Быстрицкий Л.Д., Ковалевский Е.П. Получение геля гидроксида алюминия электролизом на переменном токе // Неорганические материалы. — 2002. — Т. 38. — № 9. — С. 1087–1090.
11. Ханова Е.А., Коробочкин В.В. Исследование параметров пористой структуры диоксида титана, полученного электрохимическим синтезом на переменном токе // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 3. — С. 89–94.

Поступила 30.08.2010 г.

УДК 541.18

ТЕМПЕРАТУРА НАЧАЛА ОКИСЛЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ, МОЛИБДЕНА, ВОЛЬФРАМА, ПОРОШКА ХРОМА И ИХ СМЕСЕЙ

А.П. Ильин, Л.О. Толбанова

Томский политехнический университет
E-mail: tolbanowa@tpu.ru

Экспериментально установлено, что после смешения нано- и грубодисперсных порошков с нанопорошками температура начала окисления смесей не определяется температурой начала окисления термически менее устойчивого компонента, а принимает новое значение, отличающееся от температуры начала окисления исходных компонентов. Такая закономерность объясняется взаимным влиянием двойных электрических слоев, сформированных за счет окислительно-восстановительных процессов в поверхностных и приповерхностных слоях наночастиц.

Ключевые слова:

Нанопорошок, окисление в воздухе, тепловой взрыв, алюминий, хром, молибден, вольфрам, реакционная способность, псевдоемкость, двойной электрический слой, параметры химической активности.

Key words:

Nanopowder, oxidation in air, thermal explosion, aluminium, chromium, molybdenum, tungsten, reactivity, pseudocapacity, double electric layer, chemical activity parameters.

Ранее предполагалось, что устойчивость порошков металлов к спеканию и окислению снижается при повышении их дисперсности [1]. Действительно, такая закономерность наблюдается, например, для порошков алюминия при переходе от грубодисперсного (АСД-1, 100 мкм) к микронному (АСД-6, 1...3 мкм). Для нанопорошков (НП) алюминия в диапазоне диаметра частиц от 50 до 200 нм температура начала окисления не зависит от дисперсности, что объясняется особенностью структу-

ры оксидно-гидроксидной оболочки [2]. При этом толщина оксидно-гидроксидной оболочки на наночастицах в несколько раз меньше, чем на микронных порошках и составляет от 2 до 10 нм [2, 3]. Несмотря на уменьшение ее толщины она препятствует протеканию окисления за счет электрического потенциала, который постоянен. Процесс начала окисления НП при нагревании носит пороговый характер и протекает в режиме теплового взрыва [2]. К настоящему времени механизм нача-

ла окисления наночастиц металлов и его перехода в тепловой взрыв изучен не достаточно [4], чтобы обосновать реально протекающие процессы при нагревании нанопорошков в воздухе.

Наличие запасенной энергии в НП [5–7] и ее величина связаны со структурой и состоянием двойного электрического слоя. Его устойчивость определяет температуру начала окисления НП, совместимость с другими порошками.

Целью настоящей работы являлось изучение особенностей термической устойчивости нанопорошка алюминия и его смесей с порошком хрома, нанопорошками молибдена и вольфрама.

1. Характеристики порошков и методики исследования

Нанопорошок алюминия. Основу исследуемых смесей составлял НП алюминия, полученный с помощью электрического взрыва алюминиевых проводников в среде газообразного аргона [8]. Микро- и наноструктурные характеристики НП алюминия были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп JSM-6500F).

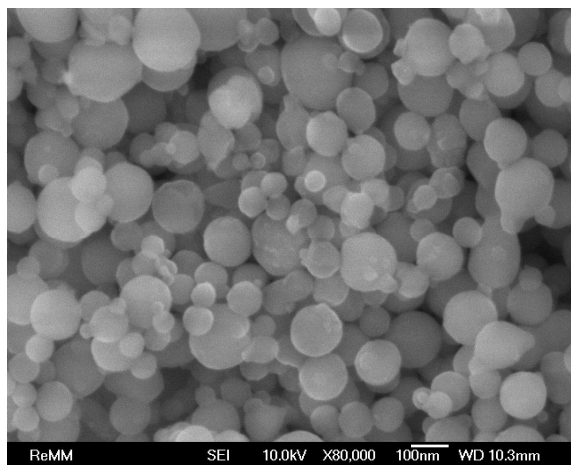


Рис. 1. Микрофотография НП алюминия

НП алюминия представлял собой частицы диаметром 100 нм, но присутствовали и частицы большего диаметра – порядка 200 нм (рис. 1). Вместе с тем, в порошке было достаточно много частиц и меньшего диаметра – 50...60 нм. Форма частиц была близка к сферической, имелись отдельные агломераты частиц, которые были частично спечены. Площадь удельной поверхности (по БЭТ, ASAP 2020, Philips) была равна $\sim 12 \text{ м}^2/\text{г}$, а насыпная плотность данного образца НП была близка к $0,12 \text{ г}/\text{см}^3$.

По данным рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр Rigaku) НП алюминия состоял из одной фазы – металлического алюминия, а оксидно-гидроксидная оболочка, по-видимому, рентгенаморфна, и ее рефлексы на рентгенограмме отсутствовали. При хранении НП алюминия более трех лет в условно герметичной таре содержание металлического алюминия не снижалось, но происходи-

ла кристаллизация защитной оболочки: при проведении РФА обнаруживались рефлексы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

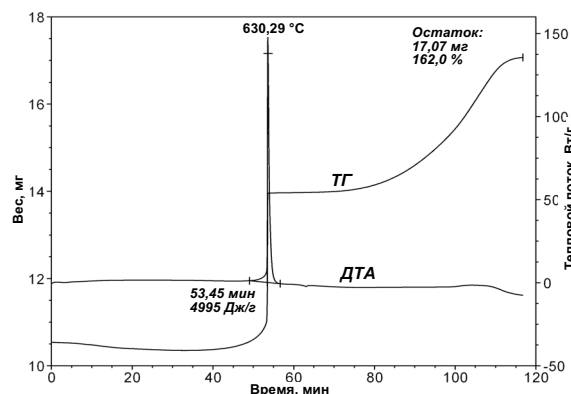


Рис. 2. Термограмма исходного НП алюминия (атмосфера – воздух, скорость нагрева 12 град./мин)

При нагревании в воздухе согласно дифференциально-термическому анализу (ДТА) (термоанализатор SDT Q 600 Научно-аналитического центра ТПУ) НП алюминия был не активен до $500...550 \text{ }^\circ\text{C}$, но выше $550 \text{ }^\circ\text{C}$ проявлял высокую активность в сравнении с другими, используемыми в данной работе порошками (рис. 2). Согласно термогравиметрическому анализу (ТГ) заметна десорбция газообразных веществ, адсорбированных и абсорбированных частицами ($\sim 3 \text{ мас. } \%$) (рис. 2). Затем происходило резкое увеличение скорости роста массы (ТГ) и выделение теплоты, носящие взрывоподобный характер (ДТА).

Порошок хрома. В работе был использован порошок хрома марки ПХ1С, полученный методом распыления расплава хрома в среде аргона при атмосферном давлении. Размер частиц порошка не превышал 40 мкм. Порошок представляет собой округлые неограниченные частицы неправильной формы. Насыпная плотность равна $2,25 \text{ г}/\text{см}^3$. Площадь удельной поверхности составляет $\sim 0,03 \text{ м}^2/\text{г}$. Порошок хрома имел серый цвет. Содержание элементного хрома в порошке составляло 99,4 мас. %. Температура начала окисления порошка хрома превышала $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Процесс окисления порошка хрома протекал медленно: скорость окисления составляла $8 \cdot 10^{-3} \text{ мас. } \%/с$.

Нанопорошок молибдена. НП молибдена был получен также с помощью электрического взрыва молибденового проводника в среде газообразного аргона. НП молибдена состоял из частиц неправильной формы, которые образовались путем частичного (неполного) спекания более мелких сферических частиц. Фрагменты спеков имели размер от 50 до 400 нм. Площадь удельной поверхности (по БЭТ) составляла $5,4 \text{ м}^2/\text{г}$.

По данным РФА НП молибдена состоял из одной фазы – альфа-молибдена. На частицах молибдена толщина оксидной оболочки не превышала 4 нм. В то же время в условиях электрического взрыва проводников и при пассивировании возможно произошло частичное спекание наноча-

стиц, но и в таком состоянии НП характеризовались высокой дисперсностью и высокой реакционной способностью.

При нагревании НП молибдена (рис. 3) процесс его окисления протекал в две стадии с максимумами при 441 и 517 °С, что сопровождалось увеличением массы образца. Наличие двух максимумов тепловыделения, наиболее вероятно, связано с бимодальным распределением частиц по диаметру: сначала окислялась фракция более мелких частиц, а затем — частицы более крупной фракции. Аналогичный эффект ранее наблюдался для НП никеля, алюминия, сплава цинка и других НП, полученных с помощью электрического взрыва проводников [8]. Необходимо также отметить, что вероятность образования MoO_3 при повышенных температурах мала: оксид молибдена (IV) практически мгновенно окисляется до MoO_3 , и его можно получить только в восстановительной среде [9]. При дальнейшем нагревании, начиная с 784 °С, наблюдался эндозэффект и резкое уменьшение массы образца, связанные с возгонкой оксида молибдена (VI).

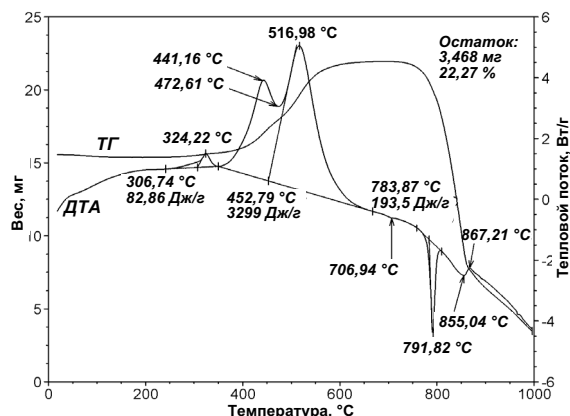


Рис. 3. Термограмма исходного НП молибдена (атмосфера – воздух, скорость нагрева 12 град/мин)

На термограмме НП молибдена при температуре ~300 °С наблюдался эффект выделения тепла (8 кДж/моль), не сопровождавшийся изменением массы образца. Такой тепловой эффект объясняется протеканием релаксационных процессов в структуре наночастиц, что для НП молибдена обнаружено впервые [10].

Нанопорошок вольфрама. НП вольфрама также получали с помощью электрического взрыва вольфрамового проводника в среде газообразного аргона [8]. НП вольфрама состоял из сферических частиц диаметром 100 нм, имелись отдельные агломераты частиц, которые частично спечены. Площадь удельной поверхности (по БЭТ) была равна ~3,2 м²/г. Основной фазой НП вольфрама, согласно РФА, являлся альфа-вольфрам, а во фракции мелких частиц присутствовал бета-вольфрам [8].

Таким образом, частицы исследуемых НП были защищены достаточно плотными и термически устойчивыми окисно-гидроксидными оболочками: температура начала окисления НП молибдена

и вольфрама была сравнима с температурой начала окисления НП алюминия.

Приготовление смесей порошков. Смесей приготавливали путем смешения порошков в сухом виде по методике, применяемой для получения пиротехнических смесей [1]. Чувствительность НП алюминия и его смесей к трению, удару и электрической искре не изучена. Смесей растирали на кальке пробкой, обернутой также в кальку. Для разрушения возможных агломератов смесь многократно пропускали через сито с размером ячеек 40 мкм.

2. Результаты экспериментов

Исследуемые смеси подвергались термическому анализу, на основе которого были определены четыре параметра химической активности [11], необходимые для оценки устойчивости к окислению и к химическому взаимодействию компонентов: температура начала окисления ($T_{н.о.}$, °С), степень окисленности (α , %), максимальная скорость окисления ($V_{\max}$, мас. %/с) и удельный тепловой эффект (ΔH , Дж/г).

Таблица 1. Состав исследуемых смесей НП алюминия с порошком хрома и параметры их химической активности

№ обр.	Состав образца, мас. %		$T_{н.о.}$, °С	α , %	$V_{\max}$, мас. %/с	ΔH , Дж/г
	Al	Cr				
1	100	0	450	63,8	0,130	4995
2	90,9	9,1	544	62,8	0,090	3073
3	83,3	16,7	521	59,9	0,090	3027
4	71,4	28,6	556	51,4	0,050	2696
5	0	100	450	28,9	0,008	2145

Параметры химической активности смесей нанопорошка алюминия с порошком хрома. Добавка порошка хрома повышала температуру начала окисления смесей (табл. 1), несмотря на равные температуры начала окисления (450 °С) исходных НП алюминия и порошка хрома. С увеличением содержания порошка хрома степень окисленности и максимальная скорость окисления смесей понижались. Удельный тепловой эффект для смесей был меньше, чем для НП алюминия.

Параметры химической активности смесей нанопорошков алюминия и молибдена изменялись монотонно (табл. 2): максимальная скорость окисления уменьшалась с увеличением содержания НП молибдена. При нагревании до 1200 °С степень окисленности смесей НП была ниже, чем НП алюминия без добавок и минимальна (20,3 %) для образца 7. Что касается величины удельного теплового эффекта, то для смесей он был меньше, чем для НП алюминия без добавок: в целом удельный тепловой эффект с увеличением содержания добавки НП молибдена уменьшался. Если для смесей НП алюминия с порошком хрома температура начала окисления была выше, чем для отдельных компо-

ментов, то с увеличением содержания НП молибдена в смеси температура начала окисления снижалась от 450 °С (НП алюминия) до 370 °С (НП молибдена).

Таблица 2. Состав исследуемых смесей НП алюминия и молибдена и параметры их химической активности

№ обр.	Состав образца, мас. %		$T_{\text{н.о.}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \%$	$V_{\text{max}}, \text{мас. \%}/\text{с}$	$\Delta H, \text{Дж/г}$
	Al	Mo				
1	100	0	450	63,8	0,130	4995
6	90,9	9,1	400	52,5	0,130	4265
7	83,3	16,7	380	42,8	0,080	4612
8	71,4	28,6	370	20,3	0,020	4020
9	0	100	350	42,3	0,007	3282

Параметры химической активности смесей нанопорошков алюминия и вольфрама. Температура начала окисления изучаемого НП алюминия составляла 400 °С, а НП вольфрама – 320 °С. С ростом содержания НП вольфрама в смесях температура начала окисления не изменялась и составляла 370 °С (табл. 3). Для смеси НП вольфрама и алюминия, содержащей 16,7 мас. % НП вольфрама, три параметра активности из четырех были в несколько раз выше, чем для других составов. При нагревании в воздухе вначале окисление НП протекало относительно медленно, а затем, с увеличением количества выделяющегося тепла, процесс окисления переходил в режим теплового взрыва [12].

Таблица 3. Состав исследуемых смесей НП алюминия и вольфрама и параметры их химической активности

№ обр.	Состав образца, мас. %		$T_{\text{н.о.}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \%$	$V_{\text{max}}, \text{мас. \%}/\text{с}$	$\Delta H, \text{Дж/г}$
	Al	W				
1	100	0	400	45,9	0,10	3594
10	90,9	9,1	380	50,3	0,10	3939
11	83,3	16,7	380	58,5	0,41	4580
12	71,4	28,6	380	56,2	0,05	4400
13	0	100	320	24,1	0,03	1104

Таблица 4. Состав исследуемых смесей НП алюминия и вольфрама и изменение температуры начала окисления

Состав смеси		Содержание добавки (Cr/Mo/W), мас. %				
		0,0	9,1	16,7	28,6	100,0
НП Al – Cr	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0	+84	+71	+106	0
НП Al – Mo		0	–50	–70	–80	–100
НП Al – W		0	–20	–20	–20	–80

В таблице 4 представлены экспериментальные результаты изменения температуры начала окисления НП алюминия в присутствии добавок порошка хрома и НП молибдена и вольфрама. В присутствии добавки порошка хрома температура начала окисления повышалась, максимально на 106 °С (28,6 % мас.). Добавки НП молибдена и вольфрама – наоборот – снижали температуру начала окис-

ления смесей. Если добавка НП молибдена с ростом ее содержания в смеси приводила к плавному понижению температуры начала окисления (максимально – на 80°), то добавка НП вольфрама – на 20°, не зависимо от содержания добавки.

3. Обсуждение результатов экспериментов

Уменьшение размеров частиц металлов приводит к появлению новых свойств: в отличие от грубодисперсных порошков, частицы исследуемых НП покрыты очень тонкой защитной оксидно-гидроксидной пленкой. Ее толщина, согласно ранее проведенным расчетам [2], составляет 2...10 нм, позже [4] прямые измерения толщины защитной пленки (просвечивающий электронный микроскоп) подтвердили расчетные данные. В то же время, толщина защитной пленки на поверхности металлов в массивном состоянии и на частицах грубодисперсных порошков превышает толщину на наночастицах в несколько раз [13]. Если бы не существовал двойной электрический слой, и устойчивость наночастиц определялась скоростью диффузии окислителя через оксидно-гидроксидный слой, то толщина защитной пленки была бы одинакова для частиц любого диаметра. В этом случае содержание металла в нанопорошке алюминия (100 нм) не превышало бы 30...40 мас. %, что противоречит экспериментальным данным: содержание металлического алюминия достигает 90...92 мас. %. Окисление металлов при низких температурах (<500 °С) происходит сначала кислородом воздуха – несколько монослоев, а затем из-за невозможности диффузии даже атомарного кислорода преобладающим окислителем становится вода (протоны). С помощью хроматографического анализа продуктов десорбции при нагревании нанопорошков алюминия, полученных в среде аргона, было установлено, что они содержат ~1 мас. % абсорбированного водорода.

Таким образом, формирование оксидно-гидроксидной оболочки на наночастицах металлов происходит за счет окислительно-восстановительных процессов с образованием двойного электрического слоя [5, 6]. Для металлов, расположенных в ряду напряжений до водорода, структура двойного электрического слоя, в общем, одинакова: приповерхностные слои наночастиц заряжены положительно, а наружные слои – отрицательно (рис. 4).

На поверхности наночастиц различных по природе металлов адсорбируются молекулы воды, которые при контакте с поверхностью оказывают влияние на электрический потенциал и на устойчивость двойного электрического слоя. В свою очередь, состояние внешней поверхности и электрический потенциал контактирующей частицы оказывает влияние на первую частицу. Таким образом, наблюдается взаимное влияние двойных электрических слоев наночастиц.

Частицы НП металлов, полученные в условиях электрического взрыва проводников в среде газобразного аргона, разделяются в электрофильтре

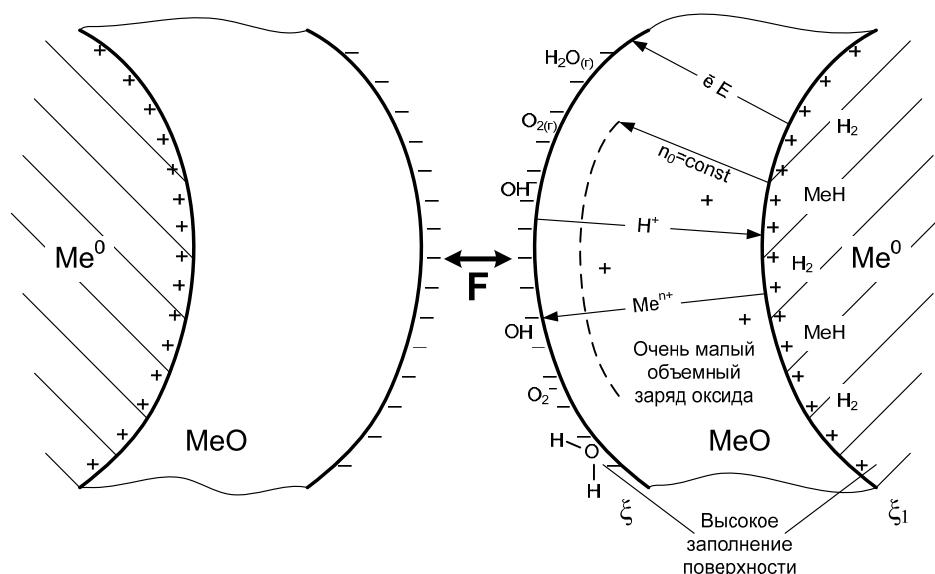


Рис. 4. Схема взаимодействия двойных электрических слоев, сформированных на поверхности наночастиц металлов [6]

на 3 фракции: на осаждающиеся на положительно и отрицательно заряженных электродах и на не имеющие заряды частицы, осаждающиеся на дно электрофилтра. Фракции заряженных частиц, согласно проведенным экспериментам [6], имеют запасенную энергию, по величине превышающую стандартную теплоту плавления в несколько раз. Для частиц, диаметр которых превышает 50 нм, запасенная энергия в виде энергии поверхности составляет не более 2...4 кДж/моль. Энергия наночастиц, в основном, сосредоточена в двойном электрическом слое, при разрушении которого и при рекомбинации зарядов, запасенная энергия выделяется в виде тепла, инициируя процессы самоспекания, спекания и горения.

При смешении НП или при обработке поверхности наночастиц реагентами происходят изменения в устойчивости двойного электрического слоя, которые, вероятно, влияют и на запасенную в них энергию. Наличие одноименных зарядов на поверхности наночастиц приводит к взаимному их отталкиванию (F, рис. 4) и к снижению насыпной плотности. Например, НП алюминия может иметь насыпную плотность 0,1 г/см³ [7].

Выводы

1. Нанопорошки, полученные в условиях электрического взрыва проводников, имеют широкое распределение частиц по диаметру: от 50 до 500 нм [8]. В то же время, при увеличении дисперсности в сериях нанопорошков алюминия

(площадь удельной поверхности от 6,7 до 10,8 м²/г) температура начала их окисления практически не изменяется и составляет 540 °С. Аналогичные результаты были получены для серии нанопорошков меди: температура начала окисления составляет 165 °С.

2. При снижении диаметра наночастиц уменьшается толщина защитной оксидно-гидроксидной оболочки. Достигнув диаметра 30...50 нм, наночастицы не содержат достаточного количества вещества, чтобы сформировалась устойчивая зарядовая структура.
3. Таким образом, в отличие от микронных порошков, при смешении как нанопорошков металлов, так и нанопорошков с грубодисперсными порошками изменяется их реакционная способность: температура начала окисления может возрасти, остаться неизменной, либо уменьшиться, что экспериментально обнаружено впервые.
4. При смешении нанопорошков необходимо учитывать изменение их реакционной способности. Нанопорошки без добавок могут быть хорошо пассивированы и иметь низкую реакционную способность, но после их смешения с другими веществами их реакционная способность может возрасти. Это представляет реальную опасность при производстве и переработке нанопорошков.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда «Глобальная энергия», проект № МГ-2008/04/2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972. — 372 с.
2. Проскуровская Л.Т. Физико-химические свойства электровзрывных ультрадисперсных порошков алюминия: Дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 1992. — 172 с.
3. Ильин А.П., Громов А.А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. — 238 с.
4. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П. и др. Горение нанопорошков металлов. — Томск: Дельтаплан, 2008. — 382 с.
5. Ильин А.П. Об избыточной энергии ультрадисперсных порошков, полученных методом взрыва проволок // Физика и химия обработки материалов. — 1994. — № 3. — С. 94–97.
6. Ильин А.П. Особенности энергонасыщенной структуры малых металлических частиц, сформированных в сильно неравновесных условиях // Физика и химия обработки материалов. — 1997. — № 4. — С. 93–97.
7. Ильин А.П., Тихонов Д.В., Толбанова Л.О. Энергонасыщенная структура поверхностных и приповерхностных слоев наночастиц металлов // Материалы науч.-практич. конф. материаловедческих обществ России. — М.: МИФИ, 2006. — С. 68–69.
8. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение. — Томск: Изд-во Том ун-та, 2005. — 227 с.
9. Рипан Р., Четяну И. Неорганическая химия. — Т. 2. — М.: Мир, 1971. — 387 с.
10. Толбанова Л.О. Синтез керамических нитридсодержащих материалов сжиганием в воздухе смесей нанопорошка алюминия с нанопорошками W и Mo и порошком Si: Дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 2007. — 212 с.
11. Ильин А.П., Яблуновский Г.В., Громов А.А. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37. — № 4. — С. 58–62.
12. Ilyin A.P., Tikhonov D.V., Tolbanova L.O. Threshold Phenomena in Nanopowders // Известия вузов. Физика. — 2006. — № 8. Приложение. — С. 550–552.
13. Хауффе К. Реакции в твердых телах и на их поверхности. Ч. 2. — М.: Изд-во ИНЛИТ, 1963. — 276 с.

Поступила 24.06.2010 г.

УДК 541.16;621.762

АКТИВИРОВАНИЕ СПЕКАНИЯ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ ДОБАВКАМИ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ

С.В. Матренин, А.П. Ильин, Л.О. Толбанова, Е.В. Золотарева*

Томский политехнический университет

*Тюменский государственный нефтегазовый университет

E-mail: vm-s@mail.ru

Исследовано спекание керамики на основе Al_2O_3 и ZrO_2 , активированное добавками нанопорошков Al_2O_3 и Al. Показано, что добавка нанопорошка Al_2O_3 до 20 мас. % в крупнодисперсный порошок $\alpha-Al_2O_3$ активировала спекание корундовой керамики: повышалась ее плотность и микротвердость. Установлена возможность получения спеченной керамики из нестабилизированного ZrO_2 путем введения в исходный нанопорошок ZrO_2 добавки нанопорошка Al в количестве не менее 10 мас. %. При спекании прессовок из нанопорошков ZrO_2 с добавкой 20 мас. % нанопорошка Al в аммиачной плазме тлеющего разряда получен керамический материал с выраженным неоднородным химическим, фазовым составом и различной микроструктурой.

Ключевые слова:

Оксидная керамика, нанопорошок, активированное спекание, плазма тлеющего разряда.

Key words:

Oxide ceramic, nanopowder, activated sintering, glow discharge plasma.

Высокопрочные керамики на основе ZrO_2 и Al_2O_3 являются весьма перспективными материалами конструкционного и инструментального назначения. Это обусловлено, с одной стороны, постоянно возрастающими требованиями к таким свойствам материалов как высокая прочность, износостойкость, термостойкость, жаропрочность, инертность к агрессивным средам. С другой стороны, перспективность оксидных керамик связана с появлением и развитием технологий, позволяющих получать материалы с уникальным комплексом физико-механических характеристик, которые в полной мере удовлетворяют выше перечисленным требованиям [1, 2]. Тем не менее, широкому

практическому распространению прочных оксидных керамик препятствуют сложность и низкая производительность технологий горячего и горячего изостатического прессования, позволяющих получать материалы с максимально высокими прочностными характеристиками [3]. Относительно простая технология одноосного прессования с последующим свободным спеканием, как правило, не позволяет получать керамику с высоким уровнем механических свойств [4]. Поэтому проблема активирования спекания керамики имеет важное практическое значение.

Целью данной работы являлось исследование методов активирования спекания оксидных кера-