

Худун Ло^{1, 2} (✉), Чжипэн Сю¹, Лицзюнь Чжэн², Кайцзи Хэ³, Мейтин Ли²¹ Университет Цинхуа, Отделение материаловедения и инжиниринга, г. Пекин, КНР² Ляонинский университет науки и технологии, отделение высокотемпературных материалов и инжиниринга из магнетизальных ресурсов, г. Аньшань, КНР³ Ляонинский университет науки и технологии, отделение науки, г. Аньшань, КНР

УДК 661.882'024:666.368(510)

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ НА СВОЙСТВА ТИТАНАТА АЛЮМИНИЯ

Рассмотрено влияние добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и температуры спекания на кристаллическую структуру, разложение и спекаемость титаната алюминия, изготовленного из алюмотитаниевого шлака (alumina-titania slag) ферросплавного завода и рутила. Для определения кристаллической фазы и микроструктуры каждой серии образцов, спеченных при 1400, 1450 и 1500 °С, использовали рентгеновскую дифракцию (XRD) и сканирующую электронную микроскопию (SEM), для расчета параметров кристаллической решетки титаната алюминия — программное обеспечение X'pert Plus, для определения кажущейся плотности и открытой пористости — метод Архимеда. Результаты исследований показали, что титанат алюминия можно синтезировать из алюмотитаниевого шлака и рутила путем твердофазной реакции. Структурные дефекты, образовавшиеся в результате воздействия добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$, ускоряют диффузию ионов в титанат алюминия. Термические дефекты, вызванные воздействием высокой температуры, также способствуют образованию титаната алюминия. Скорость разложения титаната алюминия уменьшается за счет твердого раствора, в котором Cr^{3+} и Fe^{3+} в добавке $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ замещаются на Ti^{4+} и Al^{3+} .

Ключевые слова: титанат алюминия, алюмотитаниевый шлак, добавка $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$, твердофазная реакция.

Титанат алюминия является известным керамическим материалом, обладающим пониженным тепловым расширением, высокой точкой плавления и низкой теплопроводностью. Он пригоден для использования в тех областях, где требуются высокая термостойкость или хорошие теплоизоляционные свойства — в металлургии, стекольной и керамической промышленности [1–3]. Однако неустойчивость титаната алюминия в диапазоне 750–1300 °С и его высокая стоимость значительно сужают область применения [4–7]. Высокая стоимость керамики из титаната алюминия частично объясняется стоимостью сырья, включая наноглинозем и нанорутил. Сырье получают золь-гель методом, гидротермическим синтезом, методом осаждения и т. д. [8–10]. Для снижения стоимости сырья большую часть имеющейся в продаже керамики из титаната алюминия изготавливают из порошков Al_2O_3 и рутила микронного зернового состава [11–13]. Но из-за низкой спекаемости таких крупнозернистых порошков можно получить высокую плотность керамики лишь при температуре спекания 1600 °С и даже выше [14–16].

Для улучшения спекаемости порошков, применяемых для изготовления керамики из титаната алюминия, большинство исследователей предлагают использовать сырье высокой степени чистоты [17–20]. Вопрос применения промышленных отходов, содержащих Al_2O_3 и TiO_2 , с хорошей спекаемостью затрагивается очень редко.

Алюмотитаниевый шлак, образующийся в ходе алюмотермического восстановления при производстве титанового сплава, является промышленным отходом ферросплавного производства [21, 22]. Известно, что было проведено множество исследований, касающихся введения оксидных добавок в систему $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ для повышения устойчивости и улучшения свойств титаната алюминия, однако вопросу добавки валентного комплекса для синтеза титаната алюминия уделено мало внимания [23–25]. В настоящей работе исследовали влияние комплексной добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ на кристаллическую структуру, разложение и спекаемость образцов титаната алюминия. Образцы, изготовленные из алюмотитаниевого шлака ферросплавного предприятия, спекали при различных температурах.



Худун Ло

E-mail: luoxudongs@aliyun.com

ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве сырья были взяты порошки алюмотитаниевого шлака (городской округ Иньчжоу

(Jinzhou) в провинции Ляонин на северо-востоке Китая) и рутила (аналитический реактив). Добавка $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ представляла собой реактив в пропорции 1 : 1. Титанат алюминия содержал 71,5 мас. % алюмотитаниевого шлака и 28,5 мас. % рутила, что соответствовало соотношению $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (образец 1). Сырьевые материалы были взвешены в определенных пропорциях, причем содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ составляло 1, 2, 3 и 4 мас. % (соответственно образцы 2–5). Смеси были гомогенизированы путем мокрого помола в течение 5 ч, затем высушены при 110 °С в течение 12 ч и спрессованы в пресс-формах из нержавеющей стали под давлением 200 МПа. Спрессованные образцы нагревали до 1400, 1450 и 1500 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин, выдерживали при этих температурах в течение 2 ч, а затем охлаждали вместе с печью. Структура спеченных образцов была изучена с помощью рентгеновского дифрактометра X' Pert-MPD в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении (40 кВ, 100 мА, 0,154184 нм). Параметры (cell parameters) и объем кристаллической решетки титаната алюминия были рассчитаны с помощью программного обеспечения X' Pert plus. Разложение титаната алюминия x в спеченных образцах определяли следующим образом:

$$x = \frac{I_{\text{TiO}_2} + I_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{I_{\text{Al}_2\text{TiO}_5} + I_{\text{Al}_2\text{O}_3} + I_{\text{TiO}_2}} \cdot 100 \%,$$

где $I_{\text{Al}_2\text{TiO}_5}$, I_{TiO_2} и $I_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ — интегральная интенсивность отражений: (023) — титаната алюминия, (101) — рутила, (113) — корунда.

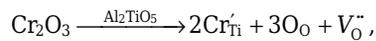
Образцы были покрыты углеродом и изучены с помощью растрового электронного микроскопа SEM (марки 6480 LV, Япония), оборудованного системой EDS (от EDAX) со сверхтонким окном, что дало возможность количественного определения даже таких легких элементов, как бор. Метод Архимеда использовали для замера кажущейся плотности и открытой пористости спеченных образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

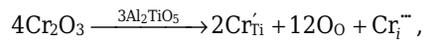
Механизм влияния добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ на синтез титаната алюминия

Твердофазная реакция, в ходе которой образуется титанат алюминия, происходит на интерфейсе. Реактивную диффузию можно рассматривать как средство управления процессом [26, 27]. Так, от скорости реактивной диффузии в интерфейсе зависят скорость твердофазной реакции и количество образующегося титаната алюминия [28–30]. Уравнения дефектов в

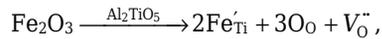
ходе процесса синтеза титаната алюминия выглядят следующим образом:



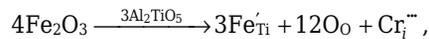
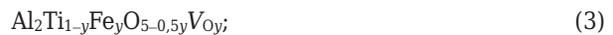
дефектная химическая формула



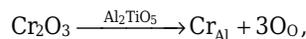
дефектная химическая формула



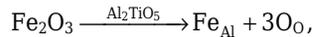
дефектная химическая формула



дефектная химическая формула



дефектная химическая формула



дефектная химическая формула



$$\Delta n_1 = \frac{r_{\text{Cr}^{3+}} - r_{\text{Ti}^{4+}}}{r_{\text{Ti}^{4+}}} \cdot 100 \% = 1,65 \% < 15 \%; \quad (7)$$

$$\Delta r_2 = \frac{r_{\text{Cr}^{3+}} - r_{\text{Al}^{3+}}}{r_{\text{Al}^{3+}}} \cdot 100 \% = 14,95 \% < 15 \%; \quad (8)$$

$$\Delta r_3 = \frac{r_{\text{Fe}^{3+}} - r_{\text{Ti}^{4+}}}{r_{\text{Ti}^{4+}}} \cdot 100 \% = 6,61 \% < 15 \%; \quad (9)$$

$$\Delta r_4 = \frac{r_{\text{Fe}^{3+}} - r_{\text{Al}^{3+}}}{r_{\text{Al}^{3+}}} \cdot 100 \% = 20,56 \%, \\ 15 \% < \Delta r_4 < 20 \%. \quad (10)$$

Дефекты, вызванные присутствием добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ в титанате алюминия, можно представить в виде формул дефектов (1)–(6). Химические формулы дефектов $\text{Al}_2\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x\text{O}_{5-0,5x}\text{V}_{0x}$ и $\text{Al}_2\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_{4/3x}\text{O}_5$ появились в уравнениях (1) и (2), потому что Cr^{3+} занимает место Ti^{4+} в структуре титаната алюминия и образует вакансии O^{2-} и междоузлия Cr^{3+} . Химические формулы дефектов $\text{Al}_2\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{5-0,5y}\text{V}_{0y}$ и $\text{Al}_2\text{Ti}_{1-y}\text{Cr}_{4/3y}\text{O}_5$

появились в уравнениях (3) и (4), потому что Fe^{3+} занимает в структуре титаната алюминия место Ti^{4+} и образует вакансии O^{2-} и междоузлия Fe^{3+} . Кроме того, Cr^{3+} и Fe^{3+} занимают в структуре титаната алюминия место Al^{3+} , химическая формула дефектов $Al_{2-x}Cr_xTiO_5$ и $Al_{2-y}Fe_yTiO_5$ принимает вид, представленный в уравнениях (5) и (6). Величины $\Delta r_1 \sim \Delta r_4$ в коэффициентах ионных радиусов в растворенном веществе и в растворителе рассчитываются в соответствии с выведенными уравнениями (7)–(10). Если величины Δr_1 и Δr_2 составляют 1,65 и 14,95 %, то это подтверждает предположение, что Cr_2O_3 растворим в титанате алюминия, в котором Al^{3+} и Ti^{4+} были замещены на Cr^{3+} . Ион Ti^{4+} может быть замещен в титанате алюминия на Fe^{3+} в результате того, что вели-

чина Δr_3 равна 6,15 %. Однако Al^{3+} может быть частично замещен на Fe^{3+} , поскольку величина Δr_3 равна 20,56 % в диапазоне 15–30 %. В результате этого вакансионные дефекты и междоузельные анионы, присутствующие благодаря тому, что структура титаната алюминия содержит добавку Cr_2O_3/Fe_2O_3 , ускоряют диффузию ионов и твердофазную реакцию, в ходе которой образуется титанат алюминия.

Концентрация c дефекта точки равновесия рассчитывается по следующему уравнению:

$$c = \frac{n_e}{n} = Ae^{-\frac{\Delta E_v}{kT}}, \quad (11)$$

где n_e — количество равновесия; n — общее количество атомов; A — коэффициент, определяемый по вибрационной энтропии (обычно 1,0); ΔE_v — изменение энергии каждой вакансии; k — константа Больцмана, которая обычно равна $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, или $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T — абсолютная температура. Уравнение (11) подтверждает предположение, что при повышении температуры спекания увеличивается концентрация дефекта точки равновесия в титанате алюминия и ускоряется твердофазная реакция его получения.

Влияние добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 на фазовый состав титаната алюминия

Рентгеновские спектры контрольных образцов, спеченных при 1400, 1450 и 1500 °С с различным количеством добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 , показаны на рис. 1. Во всех образцах образовывались три кристаллические фазы — титаната алюминия, Cr_2O_3 и TiO_2 . Титанат алюминия явился главной кристаллической фазой в образцах. Кристаллические фазы, содержащие Cr_2O_3 и Fe_2O_3 , не обнаружены на рентгенограммах ни в одном из образцов. Заметно, что дифракционная интенсивность титаната алюминия значительно возрастает в структуре алюмотитанового материала по мере повышения количества добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 и температуры. Дифракционная интенсивность титаната алюминия в образце 5, содержащем 4 % Cr_2O_3/Fe_2O_3 , является самой сильной из всей серии образцов при каждой из температур спекания. Содержание Al_2O_3 и TiO_2 постепенно снижается в титанате алюминия по мере увеличения количества добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 .

Влияние добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 на скорость разложения титаната алюминия

Скорость разложения титаната алюминия, спеченного при 1400, 1450 и 1500 °С, показана на рис. 2. Обычно она снижается по мере повышения количества добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 и

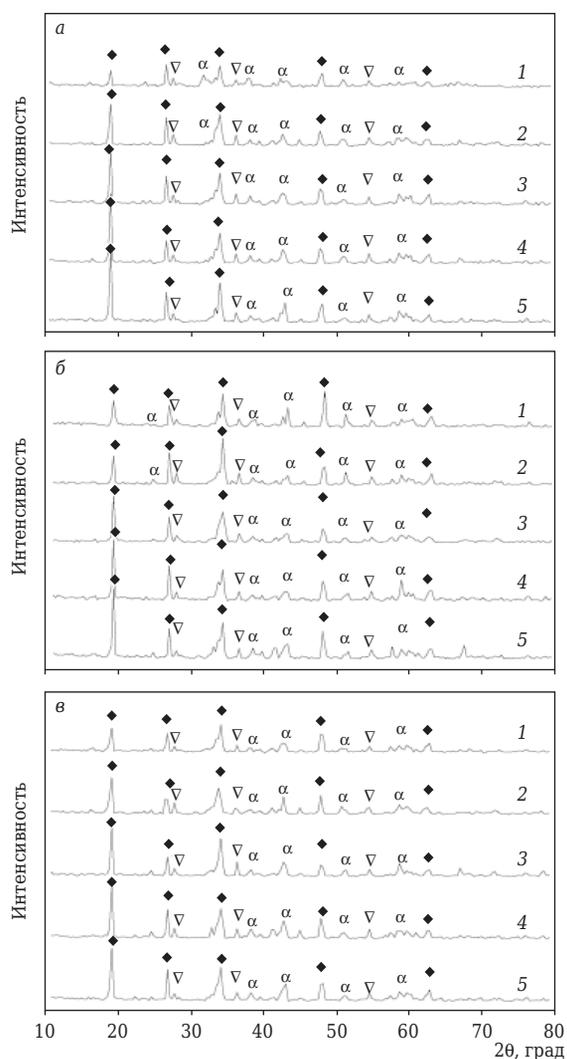


Рис. 1. Рентгеновские спектры образцов с различными количествами добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 , спеченных при 1400 (а), 1450 (б) и 1500 °С (в): 1 — образец без добавки Cr_2O_3/Fe_2O_3 ; 2–5 — образцы с добавкой соответственно 1, 2, 3 и 4 % Cr_2O_3/Fe_2O_3 ; ◆ — титанат алюминия; ▽ — TiO_2 ; α — Al_2O_3

температуры. Повышение температуры кальцинации также препятствует разложению титаната алюминия. Видно, что добавка $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ может играть стабилизирующую роль и препятствовать разложению титаната алюминия. Авторы настоящей работы считают, что снижение скорости разложения титаната алюминия в основном объясняется образованием твердого раствора, содержащего Cr^{3+} и Fe^{3+} добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. Образованию замещающего твердого раствора способствует растущая температура кальцинации.

Влияние добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ на параметры кристаллической решетки титаната алюминия

Помимо расчета параметров кристаллической решетки титаната алюминия был проведен подробный анализ искажения кристаллической решетки. Кристаллическая решетка титаната алюминия является призматической. Параметры элементарной ячейки, зависящие от межплоскостного расстояния d_{hkl} , можно рассчитать по уравнению

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \left(\frac{h}{a}\right)^2 + \left(\frac{k}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2 \quad (12)$$

Спекаемость титаната алюминия можно улучшить путем повышения количества добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и температуры спекания. Чтобы продемонстрировать влияние добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ на продукты реакции титаната алюминия, пики основной кристаллической фазы можно использовать для расчета параметров кристаллической решетки, как и характерные пики, соответствующие величине межплоскостного расстояния d_{hkl} . Параметры кристаллической решетки титаната алюминия в образцах 1–5, спеченных при 1400, 1450 и 1500 °С, значительно зависят от количества добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и температуры спекания (рис. 3). Постоянные кристаллической решетки a , b , c и ее объем постепенно увеличиваются по мере роста количества добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. Искажение кристаллической решетки титаната алюминия было проанализировано при замещении на твердый раствор добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. Искажение кристаллической решетки в результате того, что более крупные по размеру ионы Cr^{3+} (0,0615 нм) и Fe^{3+} (0,0645 нм) замещаются на Ti^{4+} (0,0605 нм) и Al^{3+} (0,0535 нм) в титанате алюминия, теоретически ведет к увеличению объема кристаллической решетки. Повышение температуры спекания ускоряет диффузию растворенных и растворяющихся ионов и процесс замещения Cr^{3+} и Fe^{3+} на Ti^{4+} и Al^{3+} .

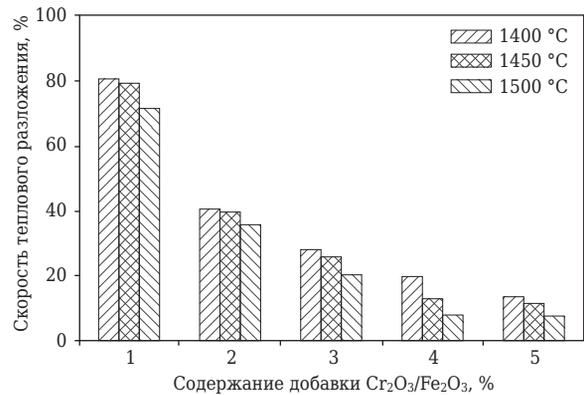


Рис. 2. Скорость теплового разложения образцов титаната алюминия с добавкой $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$, спеченных при 1400, 1450 и 1500 °С

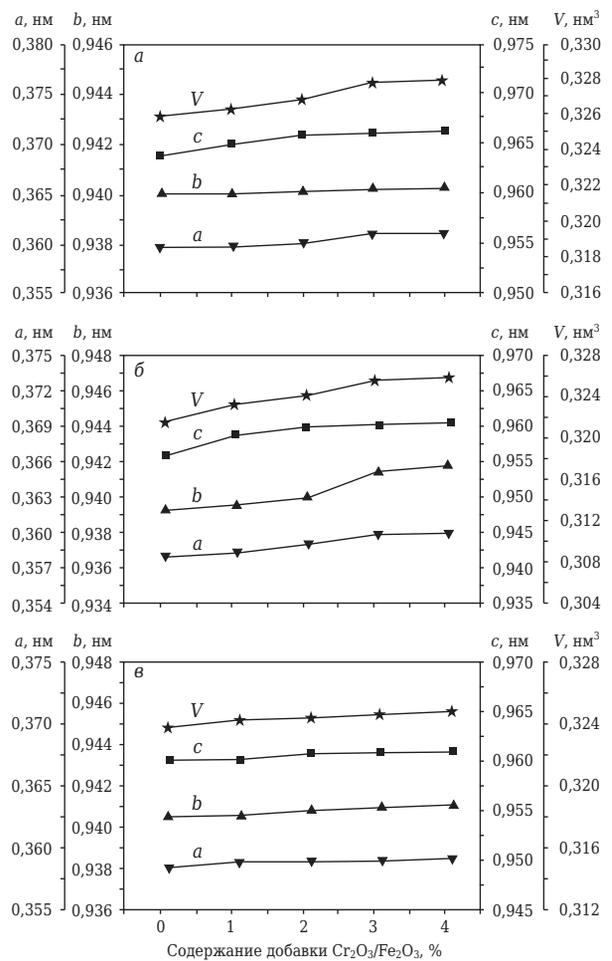


Рис. 3. Параметры a , b и c и объем V кристаллической решетки титаната алюминия, спеченного при 1400 (а), 1450 (б) и 1500 °С (в)

Влияние добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ на микроструктуру титаната алюминия

Влияние добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ на структуру титаната алюминия, спеченного при различных температурах, показано на рис. 4; фотографии образцов 1, 3 и 5 сделаны на растровом элек-

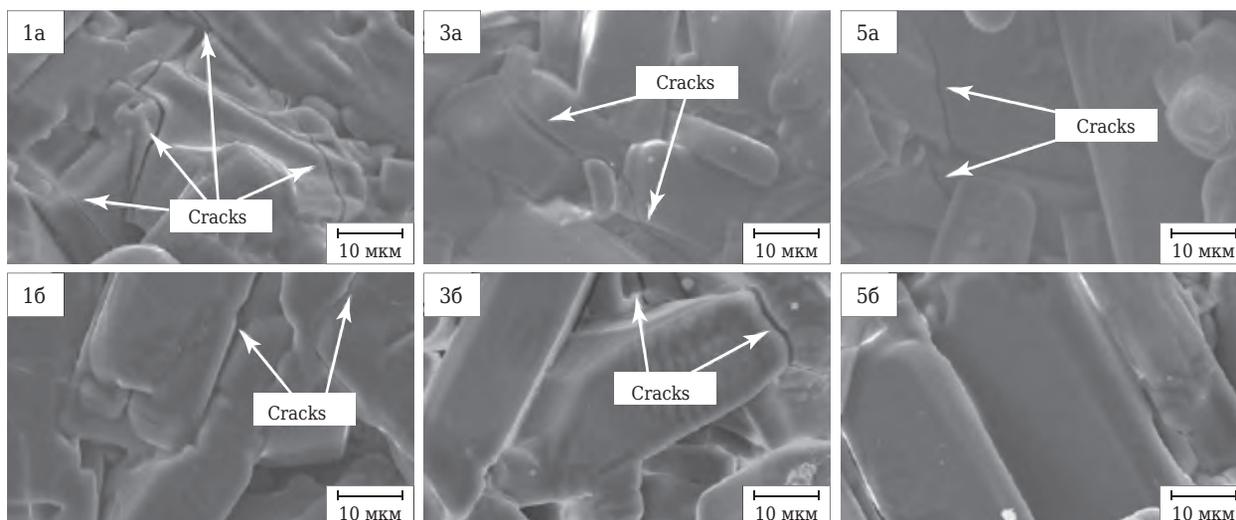


Рис. 4. Микроструктура излома образцов 1, 3 и 5 с разным количеством добавки $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$. Образцы спечены при 1400 (а) и 1500 °С (б)

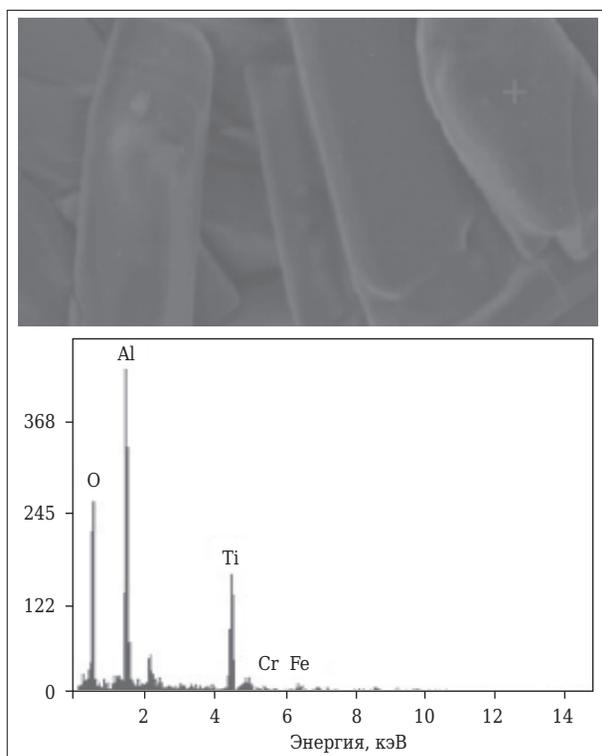


Рис. 5. Спектры, полученные методом энергетической дисперсии зерен титаната алюминия в образце 5, который был спечен при 1500 °С

тронном микроскопе (SEM). Структура кристаллической решетки титаната алюминия в обожженном образце искажена, ей требуется больше энергии, чем для нормальной структуры титаната алюминия. Большое количество энергии кристаллической решетки тратится при диффузии ионов. Как видно из рис. 4, минералогическая структура титаната алюминия первоначально образуется в образце 1, в микроструктуре которого видны крошечные

неровные трещины. По мере увеличения количества $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ формируется характерная структура титаната алюминия. Это сопровождается увеличением стеклофазы. При добавке 4% $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ зерно титаната алюминия начинает явно расти. Колоннообразный титанат алюминия появляется в перекрещивающейся структуре, в которой наблюдается меньше крохотных трещин и больше стеклофазы. Стеклофаза сконцентрирована главным образом на границах зерен титаната алюминия. Как было отмечено выше, при высоких температурах добавка $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ может ускорять диффузию на границе между жидкой и твердой фазами, что способствует аномальному росту зерна главной кристаллической фазы и повышает плотность. Если рассмотреть микроструктуру излома в образце 1 титаната алюминия, то можно заметить, что колоннообразные фрагменты образцов 3 и 5 титаната алюминия более выражены и крупнее по размеру. Повышение температуры способствует появлению твердого раствора $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и росту зерна титаната алюминия. В структуре образуется меньше трещин потому, что твердый раствор обладает более стабильной структурой, чем чистый титанат алюминия.

Спектры энергетической дисперсии зерен титаната алюминия в образце 5, который был спечен при 1500 °С, показаны на рис. 5. При анализе этих спектров заметно, что элементы Al и Fe существуют в зерне титаната алюминия отдельно от элементов Al и Ti, что оказывает хорошее влияние на кристаллит. Он становится крупнее и стабильнее. В. Д. Ткаченко (V. D. Tkachenko et al.) сообщает, что добавка некоторого количества оксида трехвалентного метал-

ла ускоряет рост кристалла и придает титанату алюминия большую стойкость [31, 32].

Влияние добавки Cr₂O₃/Fe₂O₃ на спекаемость титаната алюминия

Результаты определения кажущейся плотности и открытой пористости образцов 1–5 после спекания при 1400, 1450 и 1500 °С в течение 2 ч показаны на рис. 6. Образцы 2–5 обладают более высокой кажущейся плотностью, чем образец 1. Из рис. 6 видно, что кажущаяся плотность титаната алюминия возрастает по мере повышения количества добавки Cr₂O₃/Fe₂O₃ и температуры спекания, причем повышающаяся температура способствует улучшению спекаемости титаната алюминия и его уплотнению. Искаженная структура кристаллической решетки титаната алюминия, образующаяся в результате замещения Cr³⁺ и Fe³⁺ на Ti⁴⁺ и Al³⁺, ускоряет диффузию ионов. Термические дефекты, вызванные повышающейся температурой, способствуют твердофазной реакции и улучшению спекаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Титанат алюминия можно синтезировать из алюмотитаниевого шлака ферросплавных предприятий методом твердофазной реакции при высоких температурах. Постоянный размер кристаллической решетки титаната алюминия искажается при замещении Cr³⁺ и Fe³⁺ на Ti⁴⁺ и Al³⁺ в структуре титаната алюминия. Структурные дефекты, вызванные добавкой Cr₂O₃/Fe₂O₃, ускоряют диффузию ионов. Термические дефекты, вызванные высокими темпе-

Библиографический список

1. Wang, Y. Sliding wear behaviors of in situ alumina/aluminum titanate ceramic composites / Y. Wang, Y. Yang, Y. Zhao [et al.] // Wear. — 2009. — Vol. 266, № 11/12. — P. 1051–1057.
2. Lan, J. Effect of additives on properties of aluminum titanate ceramics / J. Lan, C. Xiao-yan, H. Guo-ming [et al.] // Transaction of nonferrous metals society of China. — 2011. — Vol. 21, № 7. — P. 1574–1579.
3. Jiang, L. Effect of additives on properties of aluminate ceramics / L. Jiang, X.-Y. Chen, G.-M. Han [et al.] // Transaction of nonferrous metals society of China. — 2011. — Vol. 21, № 7. — P. 1574–1579.
4. Shimada, T. Aluminum titanate-tetragonal zirconia composite with low thermal expansion and high strength simultaneously / T. Shimada, M. Mizuno, K. Katou [et al.] // Solid State Ionics. — 1997. — Vol. 101/103 (Part 2). — P. 1127–1133.
5. Zhang, Q. Effect of the surface properties on filtration performance of Al₂O₃-TiO₂ composite membrane / Q. Zhang, Y. Fan, N. Xu // Separation and

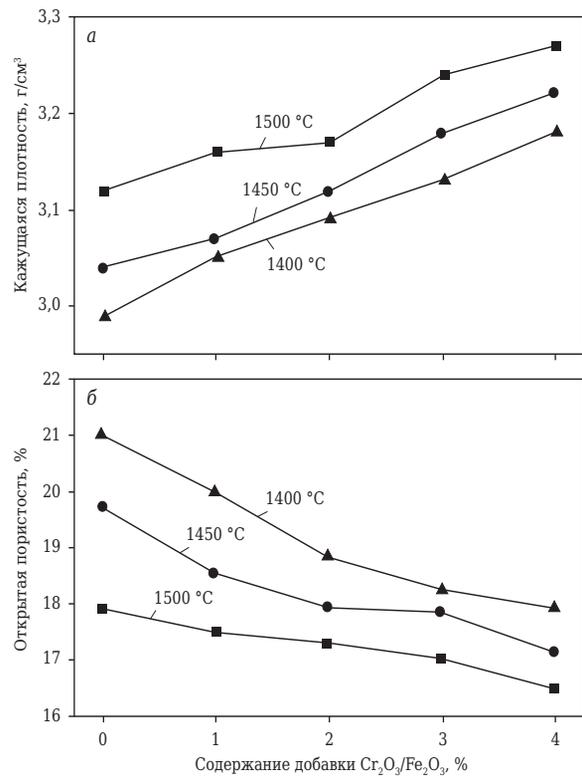


Рис. 6. Влияние добавки Cr₂O₃/Fe₂O₃ на кажущуюся плотность (а) и открытую пористость (б) образцов титаната алюминия, спеченных при разных температурах

ратурами, также способствуют твердофазной реакции и спеканию титаната алюминия.

* * *

Автор благодарит Национальный фонд по естественным наукам Китая за финансовую поддержку (грант 51402143).

- Purification Technology. — 2009. — Vol. 66, № 2. — P. 306–312.
6. Benfer, S. Ceramic membranes for filtration applications — preparation and characterization / S. Benfer, P. Arki, G. Tomandl // Advanced Engineering Materials. — 2004. — Vol. 6, № 7. — P. 495–500.
7. Baudin, C. Mechanical behavior of directionally solidified alumina/aluminum titanate ceramics / C. Baudin, A. Sayir, M. H. Berger // Acta Materialia. — 2006. — Vol. 54, № 14. — P. 3835–3841.
8. Sokov, V. N. Heat-resistant corundum concrete reinforced with aluminum oxide fibers synthesized within a matrix during firing. Part 1. Heat resistance of high-temperature materials and means of improvement / V. N. Sokov, S. D. Sokova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 223–226.
9. Kolomeitsev, V. V. Synthesis, sintering, and properties of aluminum titanate / V. V. Kolomeitsev, S. A. Suvorov, V. N. Makarov [et al.] // Refractories

- and Industrial Ceramics. — 1981. — Vol. 22, № 7/8. — P. 446–452.
10. **Gulamova, D. D.** Effect of the microstructural features on the stability of aluminum titanate / *D. D. Gulamova, M. K. Sarkisova* // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 1991. — Vol. 32, № 5/6. — P. 215–218.
11. **Liu, S.** Study of the formation process of Al₂O₃-TiO₂ composite powders / *S. Liu, W. Tao, J. Li* [et al.] // *Powder Technology*. — 2005. — Vol. 155, № 3. — P. 187–192.
12. **Low, I. M.** Effect of atmospheres on the thermal stability of aluminium titanate / *I. M. Low, Z. Oo, B. H. O. Connor* // *Physica B*. — 2006. — Vol. 385/386 (Part 1). — P. 502–504.
13. **Shi, C. G.** Effect of spodumene additions on the sintering and densification of aluminum titanate / *C. G. Shi, I. M. Low* // *Materials Research Bulletin*. — 1998. — Vol. 33, № 6. — P. 817–824.
14. **Manurung, P.** Effect of β-spodumene on the phase development in an alumina/aluminium-titanate system / *P. Manurung, I. M. Low, B. H. O'Connor* [et al.] // *Materials Research Bulletin*. — 2005. — Vol. 40, № 12. — P. 2047–2055.
15. **Kalita, S. J.** Al₂TiO₅-Al₂O₃-TiO₂ nanocomposite: Structure, mechanical property and bioactivity studies / *S. J. Kalita, V. Somani* // *Materials Research Bulletin*. — 2010. — Vol. 45, № 12. — P. 1803–1810.
16. **Huang, Y. X.** Effect of the powder precursor characteristic in the reaction sintering of alumina titanate / *Y. X. Huang, A. M. R. Senos* // *Materials Research Bulletin*. — 2002. — Vol. 37, № 1. — P. 99–111.
17. **Pratapa, S.** Microstructural and decomposition rate studies of periclase-added aluminum titanate-corundum functionally-graded materials / *S. Pratapa, K. Umaroh, E. Weddakarti* // *Materials Letters*. — 2011. — Vol. 65, № 5. — P. 854–856.
18. **Ananthakumar, S.** Microstructure and high temperature deformation characteristic of sol-gel derived aluminium titanate-mullite composites / *S. Ananthakumar, M. Jayasankar, K.G. K W.* // *Materials Chemistry and Physics*. — 2009. — Vol. 117, № 2/3. — P. 359–364.
19. **Qi, H.** Effect of TiO₂ doping on the characteristics of macroporous Al₂O₃/TiO₂ membrane supports / *H. Qi, Y. Fan, W. Xing* [et al.] // *Journal of the European Ceramic Society*. — 2010. — Vol. 30, № 6. — P. 1317–1325.
20. **Chen, C.-H.** Temperature dependence of mechanical properties of aluminum titanate ceramics / *C.-H. Chen, H. Awaji* // *Journal of the European Ceramic Society*. — 2007. — Vol. 27, № 1. — P. 13–18.
21. **Yeh, C. L.** Formation of chromium borides by combustion synthesis involving borothermic and aluminothermic reduction of Cr₂O₃ / *C. L. Yeh, J. Z. Lin, H. J. Wang* // *Ceramics International*. — 2012. — Vol. 38, № 7. — P. 5691–5697.
22. **Haidar, J.** Direct production of alloy based on titanium aluminides / *J. Haidar, S. Gnanarajan, J. B. Dunlop* // *Intermetallics*. — 2009. — Vol. 17, № 8. — P. 651–656
23. **Platt, J. P.** Grainsize evolution in ductile shear zones: Implications for strain localization and the strength of the lithosphere / *J. P. Platt, W. M. Behr* // *Journal of Structural Geology*. — 2011. — Vol. 33, № 4. — P. 537–550.
24. **Joe, I. H.** FTIR as a tool to study high-temperature phase formation in sol-gel aluminium titanate / *I. H. Joe, A. K. Vasudevan, G. Aruldas* [et al.] // *Journal of Solid State Chemistry*. — 1997. — Vol. 131, № 1. — P. 181–184.
25. **Jayasankar, M.** Al₂O₃-TiO₂-A simple sol-gel strategy to the synthesis of low temperature sintered alumina-aluminium titanate composites through a core-shell approach / *M. Jayasankar, S. Ananthakumar, P. Mukundan* [et al.] // *Journal of Solid State Chemistry*. — 2008. — Vol. 181, № 10. — P. 2748–2754.
26. **Zhu, S.** Preparation and performance of Al₂TiO₅-TiO₂-SiO₂ honeycomb ceramics by doping rare earth / *S. Zhu, Y. Shen, J. Wang* [et al.] // *Journal of Rare Earths*. — 2007. — Vol. 25, № 4. — P. 457–461.
27. **Wu, S.** Improvement in dye-sensitized solar cells employing TiO₂ electrodes coated with Al₂O₃ by reactive direct current magnetron sputtering / *S. Wu, H. Han, Q. Tai* [et al.] // *Journal of Power Sources*. — 2008. — Vol. 182, № 1. — P. 119–123.
28. **Shen, Y.** Effect of Calcining Temperature and holding time on the synthesis of aluminum titanate / *Y. Shen, Y. Z. Ruan, Y. Yu* // *Chinese Journal of Structure Chemical*. — 2009. — Vol. 28, № 2. — P. 228–234.
29. **Ono, T.** Acoustic emission studies of low thermal expansion aluminum-titanate ceramics strengthened by compounding mullite / *T. Ono, Y. Sawai, M. Ikimi* [et al.] // *Ceramics International*. — 2007. — Vol. 33, № 5. — P. 879–882.
30. **Korim, T.** Effect of Mg²⁺- and Fe³⁺-ions on formation mechanism of aluminium titanate / *T. Korim* // *Ceramics International*. — 2009. — Vol. 35, № 4. — P. 1671–1675.
31. **Tkachenko, V. D.** Influence of refractory oxide additives on the stability of aluminium titanate / *V. D. Tkachenko, E. S. Lugovskaya, E. P. Garmash* [et al.] // *Refractories and Industrial Ceramics*. — 1987. — Vol. 28, № 3/4. — P. 206–208.
32. **Yang, Y.** In situ porous alumina/aluminum titanate ceramic composite prepared by spark plasma sintering from nanostructured powders / *Y. Yang, Y. Wang, W. Tian* [et al.] // *Scripta Materialia*. — 2009. — Vol. 60 № 7. — P. 578–581. ■

Получено 20.10.14

© Худун Ло, Чжипэн Сю, Лицзюнь Чжэн, Кайцизу Хэ, Мейтин Ли, 2015 г.

© Пер. — С. Н. Клявлина (ОАО «Комбинат «Магнетит»), 2015 г.