

УДК 546.623.34+66.040.2+549.669.712.7

СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО α -LiAlO₂ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОЙ СМЕСИ ГИББСИТА И КАРБОНАТА ЛИТИЯ

© 2019 г. В. П. Исупов^{1, *}, И. А. Бородулина¹, Р. Н. Ниязова^{1, 2}, Н. В. Еремина¹

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО Российской академии наук,
Россия, 630128 Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

²Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

*e-mail: isupov@solid.nsc.ru

Поступила в редакцию 12.05.2018 г.

После доработки 04.10.2018 г.

Принята к публикации 15.10.2018 г.

Определены условия синтеза высокодисперсного однофазного α -LiAlO₂, образующегося при термической обработке механически активированной смеси гиббсита и карбоната лития на воздухе. Показано, что для синтеза α -LiAlO₂ на этапе механической активации смеси реагентов не должно происходить аморфизации гиббсита, а процесс термической обработки на воздухе должен осуществляться в интервале 650–700°C.

Ключевые слова: гидроксид алюминия, карбонат лития, механическая активация, термическое взаимодействие

DOI: 10.1134/S0002337X19030096

ВВЕДЕНИЕ

Высокодисперсные моноалюминаты лития (α -LiAlO₂, γ -LiAlO₂) представляют интерес в качестве материалов матричного электролита карбонатрасплавленных топливных элементов [1]. Для такого применения этих соединений необходимы высокие чистота ($\geq 98\%$) и удельная поверхность материала (≥ 10 м²/г). В настоящее время для этих целей используется высокотемпературный моноалюминат лития γ -LiAlO₂ [2]. Однако недавно было показано, что при длительном (20 тыс. ч) выдерживании γ -LiAlO₂ в расплаве карбонатной эвтектики Li₂CO₃ + Na₂CO₃ происходит фазовый переход γ -LiAlO₂ в его низкотемпературную форму α -LiAlO₂ [3]. Такая трансформация может нарушать работу матричного элемента, поэтому возникает вопрос о целесообразности использования высокодисперсного α -LiAlO₂ вместо γ -LiAlO₂ в качестве материала матричного электролита карбонатрасплавленных топливных элементов [3, 4].

Существует несколько способов синтеза высокодисперсного α -LiAlO₂. Среди них наибольший интерес представляет керамический метод, основанный на термической обработке шихты, содержащей соединения алюминия (оксиды, гидроксиды) и карбонат лития, при температурах ниже 700°C — температуры фазового перехода $\alpha \rightarrow \gamma$ [5].

Так, в первых работах по синтезу α -LiAlO₂ смесь корунда и карбоната лития нагревали на воздухе при 600°C в течение 200 ч с промежуточными перетираниями спеков [5, 6]. Образующийся при таком методе синтеза α -LiAlO₂ имеет низкую удельную поверхность и требует дополнительно длительного измельчения в шаровой мельнице. Позднее в качестве соединений алюминия был использован гамма-оксид алюминия, взаимодействие которого с карбонатом лития осуществляли в присутствии эвтектической смеси карбоната лития и калия при температуре 600°C в течение 24 ч [7, 8]. Для удаления эвтектики, остающейся после синтеза, использовали смесь уксусной кислоты и уксусного ангидрида с последующей промывкой твердой фазы этанолом. Несмотря на уменьшение времени термической обработки, необходимой для синтеза целевого продукта, необходимость очистки α -LiAlO₂ от щелочных карбонатов усложняет процесс синтеза целевого продукта.

Для синтеза высокодисперсного α -LiAlO₂ в качестве соединений алюминия перспективно применение тригидроксида алюминия в форме гиббсита. Так, в [9] показано, что взаимодействие крупнодисперсного гиббсита с карбонатом лития при температуре 650°C в течение 2 ч на воздухе приводит к образованию альфа-алюмината алю-

мината с примесью непрореагировавшего карбоната лития. Увеличение температуры до 700°C позволяет получать моноалюминат лития без примеси карбоната лития, однако в твердой фазе наряду с α -LiAlO₂ появляется примесь γ -LiAlO₂, содержание которой возрастает по мере увеличения температуры термической обработки. Для увеличения скорости взаимодействия между карбонатом лития и гиббситом и синтеза однофазного α -LiAlO₂ в [10] была использована предварительная гомогенизация исходной смеси в водной среде с последующей сушкой материала при 110°C в течение одного дня. Высушенную смесь прокаливали на воздухе в течение 24 ч при температурах от 600 до 800°C. Образующиеся при 600 и 700°C продукты содержали однофазный α -LiAlO₂ с удельной поверхностью, варьирующейся от 9 до 11 м²/г. Недостатками предложенного подхода являются необходимость предварительной гомогенизации смеси исходных реагентов в водной пульпе, наличие дополнительной операции сушки пульпы и последующей длительной термической обработки.

Другой путь интенсификации взаимодействия между гиббситом и карбонатом лития связан с предварительной механической активацией (МА) смеси этих реагентов в мельницах-активаторах планетарного типа с последующей термической обработкой продуктов активации на воздухе [9, 11]. Так, активация смеси гиббсита и карбоната лития в мельнице-активаторе планетарного типа АГО-2 при центробежном ускорении 40 g в течение нескольких минут приводит к существенному увеличению удельной поверхности реагентов, накоплению дефектов в кристаллической структуре этих соединений, их перемешиванию на микронном уровне, а также изменению структуры [11]. При последующей термической обработке МА-смеси на воздухе в течение 4 ч при температуре 700°C образуется смесь, состоящая из γ -LiAlO₂ и α -LiAlO₂, с удельной поверхностью более 10 м²/г. Содержание γ -LiAlO₂ в смеси прямо пропорционально содержанию рентгеноаморфного гидроксида алюминия, образующегося на стадии МА [12]. При одноминутной активации содержание рентгеноаморфной фазы гидроксида алюминия составляет 16%, α -LiAlO₂ — 80%, γ -LiAlO₂ — 20% [11]. Полученные данные указывают на то, что МА смеси гиббсита и карбоната лития в планетарном активаторе, не приводящая к существенному образованию рентгеноаморфного гидроксида алюминия, с последующей термической обработкой на воздухе при температуре ниже фазового перехода α -LiAlO₂ → γ -LiAlO₂ может быть использована для синтеза высокодисперсного α -LiAlO₂.

Целью настоящей работы явилось определение условий МА (времени процесса и величины цен-

тробежного ускорения) смеси гиббсита и карбоната лития в планетарном активаторе АГО-2 и последующей термической обработки на воздухе, необходимых для получения однофазного α -LiAlO₂ с характеристиками, удовлетворяющими требованиям к материалам матричного электролита карбонатрасплавленных топливных элементов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для работы был использован Al(OH)₃ в форме гиббсита (“ч. д. а.”) и Li₂CO₃ (“х. ч.”) с удельной поверхностью 0.2 и 1 м²/г соответственно. МА смеси осуществляли на воздухе в лабораторной планетарной центробежной мельнице АГО-2 в стальных барабанах объемом 100 мл при ускорении 10, 20 и 40 g (частота вращения ротора 420, 590 и 830 об./мин) и интервале времен от 1 до 5 мин. Для активации использовали стальные шары диаметром 5 мм, отношение массы вещества к массе шаровой загрузки составляло 1 : 20.

Для фазового анализа МА-образцов и продуктов их термической обработки применяли дифрактометр D8 Advance (CuK_α-излучение). Съемку осуществляли в диапазоне углов $2\theta = 10^\circ - 70^\circ$ с шагом 0.02° и временем накопления 35 с. Для высокотемпературных исследований РФА *in situ* использовали камеру НТК 1200N (Anton Paar, Австрия) с корундовой кюветой. Нагрев камеры проводили на воздухе от комнатной температуры до 100°C, скорость нагрева 12°C/мин. При достижении температуры нагрев прекращали и проводили регистрацию рентгенограммы, далее температуру снова подымали до 200°C с последующей записью рентгенограммы и т.д. Для оценки содержания рентгеноаморфного гидроксида алюминия (*A*, %) в активированной смеси использовали формулу $A(\%) = 100(I_0 - I_t)/I_0$, где *I*₀ — интегральная интенсивность выбранного рефлекса гиббсита в смеси до активации, *I*_т — интегральная интенсивность этого рефлекса после активации смеси в течение *t* минут. Для описания изменения фазового состава МА-смеси в процессе нагрева измеряли интегральную интенсивность рефлексов гиббсита 112, карбоната лития 110, а также образующихся при взаимодействии продуктов: бемита 020, α -LiAlO₂ 003 и γ -LiAlO₂ 101. Так как наиболее интенсивные рефлексы γ -Al₂O₃ и χ -Al₂O₃, образующихся при разложении гидроксида алюминия, перекрываются с рефлексами α -LiAlO₂ и карбоната лития, их интегральную интенсивность не измеряли.

Термическую обработку МА-смеси проводили на воздухе в муфельной печи SNOL со скоростью нагрева 10°C/мин, после достижения необходимой температуры смесь выдерживали в течение необходимого времени. Количественный состав алюминатов лития определяли путем моделиро-

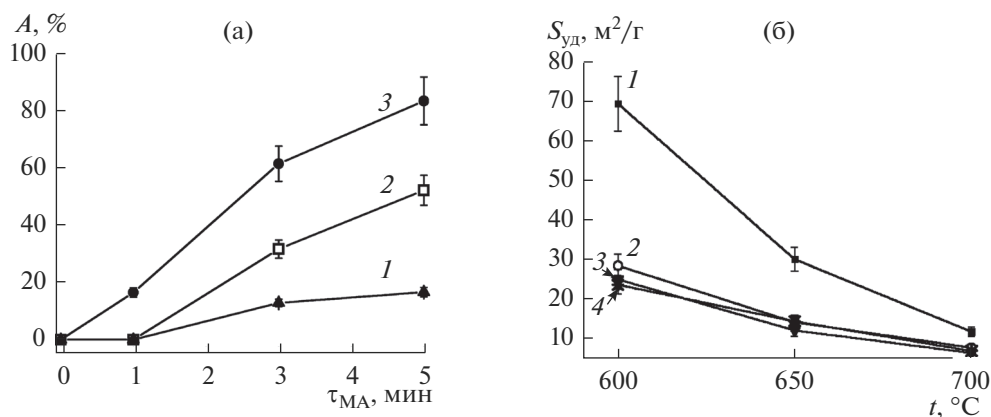


Рис. 1. Зависимости содержания рентгеноаморфного гидроксида алюминия (A , %) от времени МА и величины центробежного ускорения: 1 – 10 г, 2 – 20 г, 3 – 40 г (а) и удельной поверхности продуктов термической обработки исходной (1) и МА в течение 1 (2), 3 (3), 5 мин (4) смеси гидроксида алюминия и карбоната лития от температуры процесса (время термической обработки – 4 ч) (б).

вания профиля рентгенограммы методом Ритвельда в программе Toras 4.2 (Bruker AXS, Германия). Удельную поверхность измеряли путем десорбции аргона с использованием стандартного образца удельной поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние времени и центробежного ускорения при МА смеси гиббсита и карбоната лития на аморфизацию гидроксида алюминия. Как уже указывалось выше, имеющиеся литературные данные позволяют предполагать, что для синтеза высокодисперсного α -LiAlO₂ без значимой (единицы процентов) примеси γ -LiAlO₂ необходимо, чтобы на этапе МА смеси гиббсита и карбоната лития в планетарном активаторе не происходило существенного образования рентгеноаморфного гидроксида алюминия. Поэтому на первом этапе работы было исследовано влияние величины центробежного ускорения и времени активации смеси гиббсита и карбоната лития на содержание в продуктах активации рентгеноаморфного гидроксида алюминия (рис. 1). Как видно из рис. 1а, снижение величины центробежного ускорения с 40 до 10 г при фиксированном времени МА позволяет существенно (в разы) уменьшить содержание рентгеноаморфного гидроксида алюминия. Поэтому в дальнейших экспериментах были использованы образцы, полученные при величине центробежного ускорения 10 г в течение 1, 3 и 5 мин, с удельной поверхностью 2.7, 5.7 и 7.6 м²/г соответственно. Средний размер частиц смеси, рассчитанный по формуле $D = 6/\rho S_{уд}$, где ρ – средняя плотность смеси (2.3 г/см³), а $S_{уд}$ – удельная поверхность, составляет 1.0, 0.46 и 0.34 мкм соответственно.

Влияние условий термической обработки МА-смеси гиббсита и карбоната лития на образование

α -LiAlO₂. При термической обработке неактивированной смеси выше 200°C происходит разложение гиббсита с образованием χ -Al₂O₃ и бемита (рис. 2, 3). Бемит в интервале от 400 до 600°C разлагается с образованием γ -Al₂O₃. При температуре выше 600°C карбонат лития взаимодействует с χ -Al₂O₃ и γ -Al₂O₃ с образованием α -LiAlO₂. Наряду с рефлексами α -LiAlO₂ при температуре 800°C начинают появляться рефлексы γ -LiAlO₂. При охлаждении образца до комнатной температуры в твердой фазе наряду с рефлексами α -LiAlO₂ и γ -LiAlO₂ наблюдаются слабые рефлексы карбоната лития, что свидетельствует о незавершенности реакции.

Для смеси, активированной в течение 1 мин, нагревание до 300°C также приводит к образованию бемита и χ -Al₂O₃ (рис. 4, 5). Количество бемита, образующегося при разложении гидроксида алюминия в МА-смеси, меньше по сравнению с неактивированной смесью. Разложение бемита также начинает происходить в интервале от 400 до 500°C (рис. 5) и сопровождается образованием γ -Al₂O₃. Интенсивность рефлексов карбоната лития начинает уменьшаться в температурном интервале от 500 до 600°C, при 700°C рефлексы карбоната лития практически полностью исчезают и регистрируются только рефлексы α -LiAlO₂ (рис. 5). Нагревание до 800°C приводит к появлению слабых рефлексов гамма-моноалюмината лития. При снижении температуры образца до комнатной на рентгенограмме наблюдаются преимущественно рефлексы α -LiAlO₂, а также γ -LiAlO₂ небольшой интенсивности, рефлексы карбоната лития отсутствуют.

Картины фазовых превращений при термической обработке смесей, активированных в течение 3 и 5 мин, качественно аналогичны картине

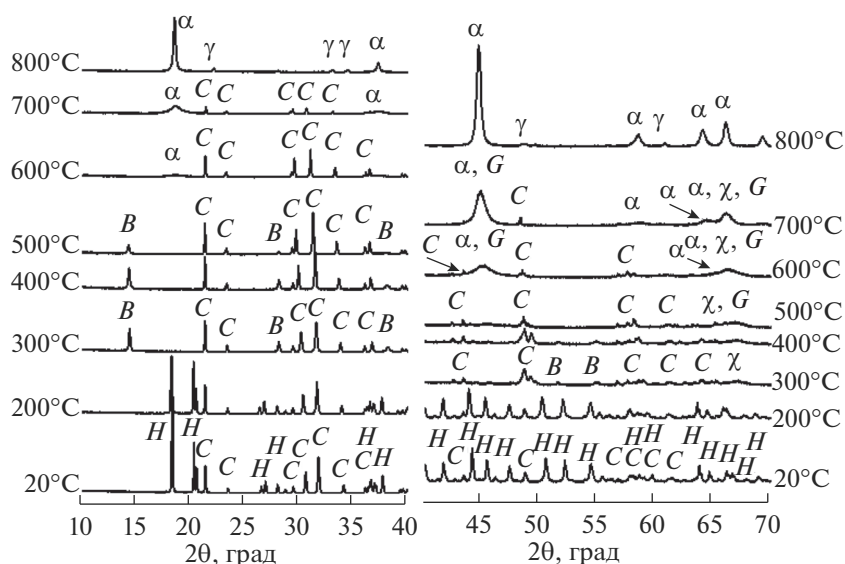


Рис. 2. Результаты РФА *in situ* исходной смеси гидроксида алюминия и карбоната лития на воздухе: H – $\text{Al}(\text{OH})_3$, C – Li_2CO_3 , B – $\text{AlO}(\text{OH})$, χ – $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$, G – $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, α – $\alpha\text{-LiAlO}_2$, γ – $\gamma\text{-LiAlO}_2$.

при $\tau_{\text{МА}} = 1$ мин. Наблюдается дальнейшее уменьшение содержания бемита, образующегося при разложении гидроксида алюминия, увеличение интенсивности рефлексов $\alpha\text{-LiAlO}_2$, образующегося при 600°C, и увеличение интенсивности рефлексов $\gamma\text{-LiAlO}_2$, образующихся при нагревании до 800°C.

Таким образом, данные РФА *in situ* свидетельствуют о том, что оптимальные температуры, необходимые для образования $\alpha\text{-LiAlO}_2$ как из неактивированной, так и из активированной смеси, лежат в интервале от 600 до 700°C. Нагрев до тем-

ператур ниже этого интервала приводит к неполному взаимодействию между исходными реагентами, нагрев до более высоких температур приводит к появлению примеси высокотемпературного $\gamma\text{-LiAlO}_2$.

Следующим этапом работы явилось исследование влияния условий термической обработки на фазовый состав и удельную поверхность $\alpha\text{-LiAlO}_2$. Исследование было выполнено на образцах, полученных при прокаливании исходной и МА в течение 1, 3 и 5 мин смеси гиббсита и карбоната лития при температурах 600, 650 и 700°C в течение 4 ч (рис. 6). Термическая обработка неактивированной смеси во всем исследованном температурном интервале приводит к образованию $\alpha\text{-LiAlO}_2$, содержащего примесь непрореагировавшего карбоната лития (рис. 6а). Предварительная МА смеси в течение 1 мин увеличивает скорость взаимодействия между реагентами и позволяет получить при 650–700°C практически однофазный $\alpha\text{-LiAlO}_2$ (рис. 6б). Увеличение времени активации до 3 и 5 мин приводит к появлению в продуктах взаимодействия наряду с $\alpha\text{-LiAlO}_2$ примеси $\gamma\text{-LiAlO}_2$, количество которого возрастает при увеличении температуры термической обработки и времени МА (рис. 6в, 6г, табл. 1). Содержание примесной фазы $\gamma\text{-LiAlO}_2$ в $\alpha\text{-LiAlO}_2$ практически линейно коррелирует с содержанием рентгеноаморфного гидроксида алюминия (табл. 1). Для того чтобы содержание примесной фазы $\gamma\text{-LiAlO}_2$ в $\alpha\text{-LiAlO}_2$ не превышало единиц %, необходимо, чтобы содержание рентгеноаморфного гидроксида в МА-смеси находилось на таком же уровне.

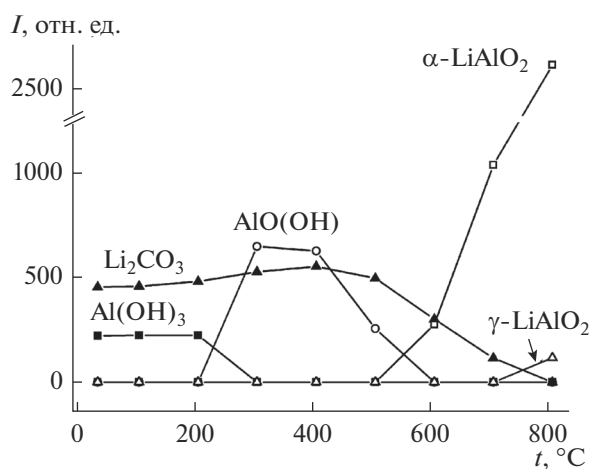


Рис. 3. Зависимости интегральной интенсивности рефлексов фаз, образующихся при термической обработке смеси карбоната лития и гиббсита, от температуры термической обработки.

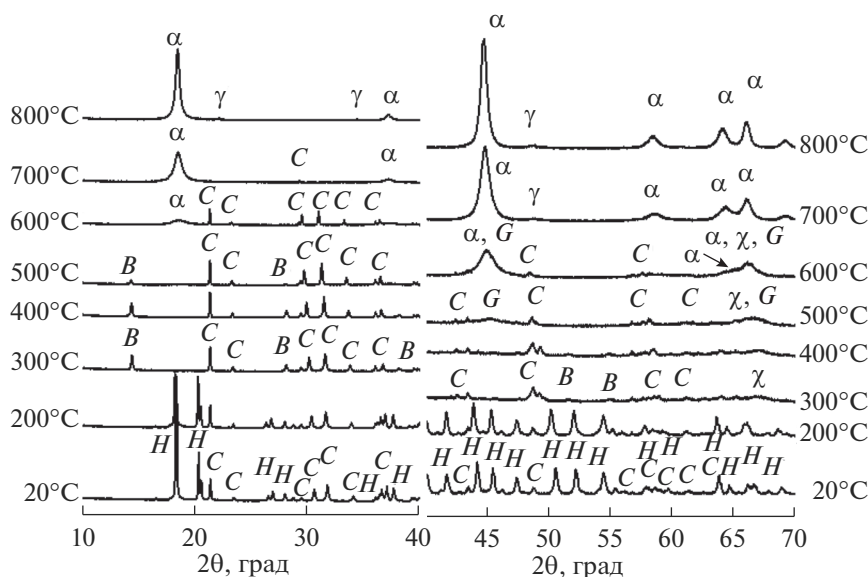
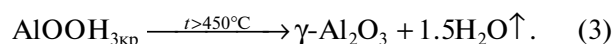
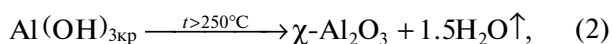
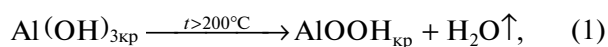


Рис. 4. Результаты РФА *in situ* смеси гидроксида алюминия и карбоната лития, МА в течение 1 мин, на воздухе: *H* – Al(OH)₃, *C* – Li₂CO₃, *B* – AlO(OH), *χ* – χ -Al₂O₃, *G* – γ -Al₂O₃, α – α -LiAlO₂, γ – γ -LiAlO₂.

Удельная поверхность алюмината лития зависит от времени активации смеси реагентов, а также от температуры ее термической обработки (рис. 16). Наиболее высокая удельная поверхность наблюдается для продуктов, образующихся при термической обработке исходной смеси гиббсита и карбоната лития при 600°C. При увеличении температуры обработки удельная поверхность уменьшается (кривая 1 на рис. 16). Такая же зависимость удельной поверхности α -LiAlO₂ от температуры наблюдается при термической обработке МА-образцов (кривые 2–4 на рис. 16). При одной и той же температуре термической обработки удельная поверхность снижается при увеличении времени МА смеси. Удельная поверхность однофазного α -LiAlO₂, синтезированного при $\tau_{\text{МА}} = 1$ мин и температуре термической обработки, варьирующейся от 650 до 700°C, лежит в интервале от 10 до 15 м²/г, что отвечает требованиям, предъявляемым к материалам матричного электролита карбонатрасплавленного топливного элемента.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно литературным данным, образование α -LiAlO₂ при термической обработке смеси гиббсита и карбоната лития происходит при температуре выше 600°C за счет взаимодействия карбоната лития с кристаллическими γ -Al₂O₃ и χ -Al₂O₃, образующимися по реакциям [11, 13]:



Кристаллические оксиды χ -Al₂O₃ и γ -Al₂O₃ образуют псевдоморфозу по сферолитовидным сросткам кристаллов исходного гиббсита, размер которых для крупнокристаллического материала лежит преимущественно в интервале от 60 до 150 мкм. Ввиду больших размеров образующихся частиц оксида алюминия скорость их взаимодействия с карбонатом лития в условиях эксперимента (600–700°C, 4 ч) не приводит к полному взаимодействию реагентов. Продукты взаимо-

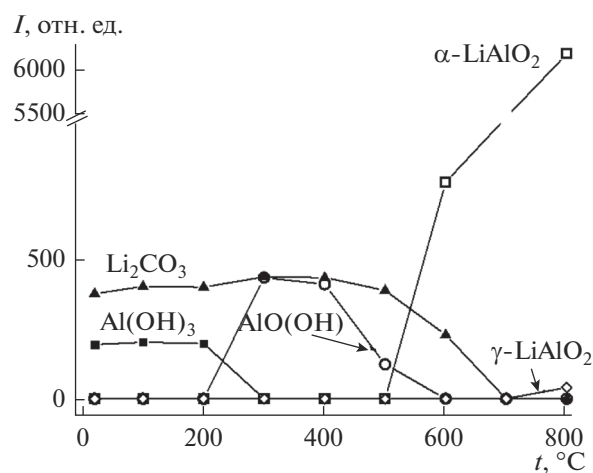


Рис. 5. Зависимости интегральной интенсивности рефлексов фаз, образующихся при термической обработке МА-смеси карбоната лития и гиббсита, от температуры термической обработки ($\tau_{\text{МА}} = 1$ мин).

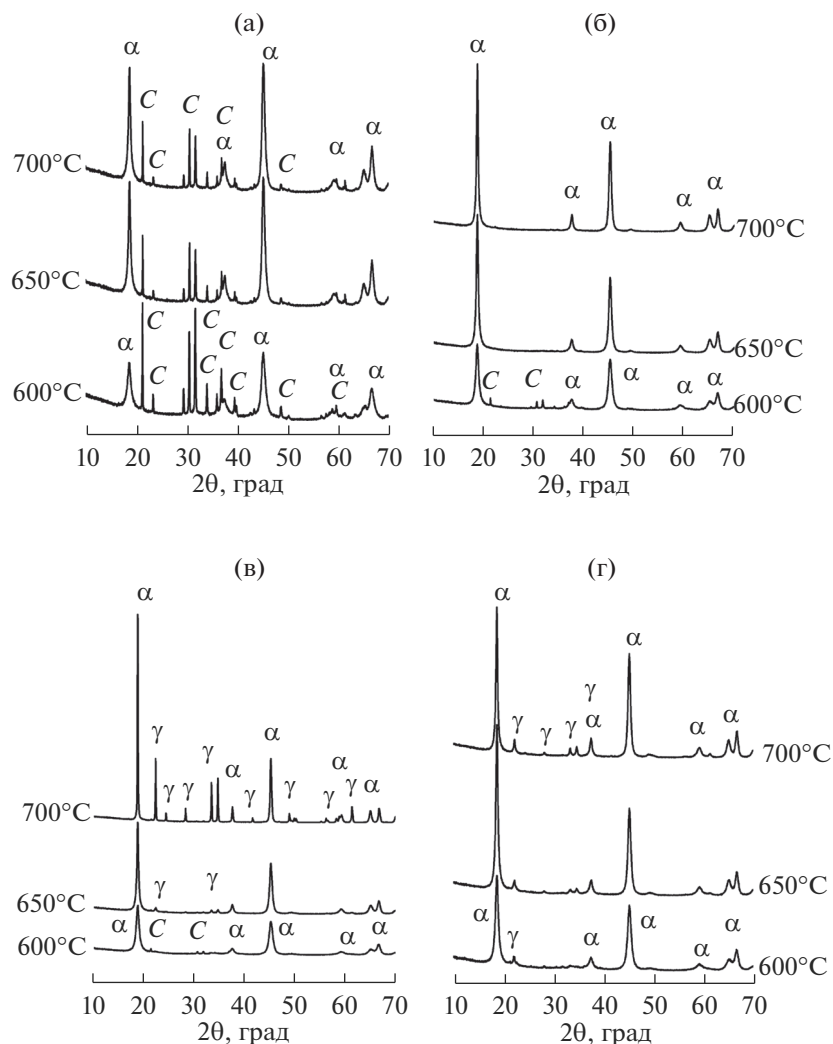


Рис. 6. Рентгенограммы продуктов, образующихся при термической обработке исходной (а) и МА в течение 1 (б), 3 (в), 5 мин (г) смесей гидроксида алюминия и карбоната лития (время термической обработки 4 ч).

действия содержат как α - LiAlO_2 , так и непрореагировавшие карбонат лития и оксиды алюминия. Кратковременная активация смеси реагентов при центробежном ускорении 10 g в течение 1 мин при-

Таблица 1. Зависимость фазового состава продуктов, образующихся при термической обработке смесей гидроксида алюминия и карбоната лития на воздухе при 700°C в течение 4 ч, от времени МА

$\tau_{\text{МА}}$, мин	A , %	Содержание, мас. %		
		Li_2CO_3	α - LiAlO_2	γ - LiAlO_2
0	0	1.7	98.3	—
1	1.5	—	99.0	1.0
3	11	—	94.0	6.0
5	16	—	88.3	11.7

Примечание. A — степень аморфизации гиббсита.

водит к уменьшению среднего размера частиц гиббсита и карбоната лития примерно на порядок при практическом отсутствии аморфизации гиббсита. Существенное уменьшение размера частиц гиббсита и образующихся кристаллических оксидов алюминия приводит к увеличению скорости взаимодействия между оксидами и карбонатом лития с образованием практически однофазного высокодисперсного α - LiAlO_2 без существенной примеси карбоната лития. Увеличение времени МА смеси до 3 и 5 мин приводит к дальнейшему уменьшению размера частиц гиббсита, а также к появлению примеси рентгеноаморфного гидроксида алюминия.

Термическая обработка активированной смеси приводит не только к дальнейшему увеличению скорости взаимодействия между кристаллическими оксидами и карбонатом лития, но и к разложению рентгеноаморфного гидроксида алюминия и по-

явлению, наряду с кристаллическими оксидами алюминия, примеси рентгеноаморфного π -Al₂O₃, взаимодействие которого с карбонатом лития является причиной образования примеси γ -LiAlO₂ в α -LiAlO₂ [11, 14]. Эта точка зрения подтверждается наличием линейной корреляции между содержанием γ -LiAlO₂ в α -LiAlO₂ и количеством рентгеноаморфного гидроксида алюминия после МА, отмеченной выше. При температурах термической обработки выше 700°C образование примеси γ -LiAlO₂ может происходить также за счет фазового перехода α -LiAlO₂ в γ -LiAlO₂.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механическая активация смеси гиббсита и карбоната лития в планетарном активаторе АГО-2 в течение 1–3 мин при центробежном ускорении 10 g с последующей термической обработкой МА-смеси при 650–700°C в течение нескольких часов позволяет получать высокодисперсный α -LiAlO₂ с характеристиками, приемлемыми для использования этого вещества в матричном электролите карбонатрасплавленных топливных элементов. Полученные данные свидетельствуют о том, что для получения α -LiAlO₂ с низким содержанием примеси γ -LiAlO₂ необходимо, чтобы на этапе МА смеси реагентов не происходило существенной (не более 1–2%) аморфизации гидроксида алюминия.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят Н.В. Булину за проведение рентгенофазового анализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХТТМ СО РАН (проект 0301-2018-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molten Carbonate Fuel Cells // Fuel Cell Handbook. 7-th Ed. Morgantown, 2004.
2. Электронный ресурс: <https://www.fuelcellenergy.com/products/>.
3. Choi H.J., Lee J.J., Hyun S.H., Lim H.C. Phase and Microstructural Stability of Electrolyte Matrix Materials for Molten Carbonate Fuel Cells // Fuel Cells. 2010. V. 10. № 4. P. 613–618.
4. Choi H.J., Lee J.J., Hyun S.H., Lim H.C. Fabrication and Performance Evaluation of Electrolyte-combined α -LiAlO₂ Matrices for Molten Carbonate Fuel Cells // Int. J. Hydrogen Energy. 2011. V. 36. P. 11048–11055.
5. Семенов Н.Н., Меркулов А.Г., Фомин А.Г. О низкотемпературной модификации алюмината лития // II Всесоюз. совещ. по редким щелочным элементам. Новосибирск: Наука, 1967. С. 100–109.
6. Lehmann H.A., Hesselbarth H. Über eine neue Modifikation des LiAlO₂ // Z. Annorg. Allg. Chem. 1961. № 313. P. 117–124.
7. Kinoshita K., Sim J.W., Ackerman J.P. Preparation and Characterization of Lithium Aluminate // Mater. Res. Bull. 1978. № 13. P. 445–455.
8. Kinoshita K., Sim J.W., Kusera G.H. Synthesis of Fine Particle Size Lithium Aluminate for Application un Molten Carbonate Fuel Cells // Mater. Res. Bull. 1979. V. 14. P. 1357–1368.
9. Харламова О.А., Митрофанова Р.П., Исупов В.П. Синтез ультрадисперсного γ -LiAlO₂ с помощью механической активации и отжига // Неорганические материалы. 2007. Т. 43. № 6. С. 732–737.
10. Choi H.J., Lee J.J., Hyun S.H., Lim H.C. Cost-effective Synthesis of α -LiAlO₂ Powders for Molten Carbonate Fuel Cell Matrices // Fuel Cells. 2009. № 5. P. 605–612.
11. Исупов В.П., Трухина Я.Е., Еремина Н.В., Булина Н.В., Бородулина И.А. Механохимический синтез высокодисперсного γ -LiAlO₂ // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. № 11. С. 1262–1270.
12. Исупов В.П., Еремина Н.В., Бородулина И.А., Герасимов К.Б., Булина Н.В. Механохимический синтез высокодисперсных наноструктурированных монокристаллов лития // VI Всерос. Конф. по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи. М.: ИМЕТ РАН, 2016. С. 26–27.
13. Gao J., Shi S., Xiao R., Li H. Synthesis and Ionic Transport Mechanisms of α -LiAlO₂ // Solid State Ionics. 2016. V. 286. P. 122–134.