

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 544.02

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОРОШКОВ БОРА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СОСТАВАХ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2022 г. Е. А. Лебедева^{1*}, С. А. Астафьева¹, Т. С. Истомина¹

¹Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

*E-mail: itch.elena@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2021;

после доработки 17.05.2021;

принята в печать 20.05.2021

Структурно-морфологические свойства порошков коммерческого аморфного бора марки В, прошедших модифицирование ацетонитрилом, слабой азотной кислотой, а также фторсодержащими соединениями, изучены методами Брунауэра, Эммета и Теллера, сканирующей электронно-микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния. Проведен анализ влияния указанных свойств на окисление порошков с использованием метода термогравиметрии. Показано, что удаление поверхностного слоя в виде оксида бора и борной кислоты привело к более полной степени окисления порошка.

Ключевые слова: бор, бориды магния, оксид бора, термогравиметрический анализ, структурно-морфологические свойства.

DOI: 10.31857/S0207401X22010101

ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе бора и боридов металлов находят широкое применение в аэрокосмических и атомных установках, узлах трения и в обработке материалов, химическом машиностроении, катализе, электронике и энергетике [1, 2]. Это связано с уникальными свойствами бора, в частности с его высокой твердостью, низкой плотностью и высокой температурой плавления (выше 2000°C) [3].

Вследствие значительной реакционной способности и высокой температуры плавления бор трудно получить в виде монокристаллов высокой чистоты, а также в виде определенных кристаллических модификаций. По-видимому, по этой же причине различаются данные о внешнем виде и температуре плавления бора.

Повышенный интерес к бору в аэрокосмической области вызван его термодинамической привлекательностью в качестве энергетического горючего для твердых ракетных топлив, взрывчатых веществ и пиротехники [4–6]. По сравнению с алюминием, широко используемым в высокоэффективных силовых установках, бор имеет объемную теплотворную способность, которая примерно на 61% выше, и гравиметрическую теплотворную способность, которая выше примерно на 86% [7] при условии полного сгорания.

Однако эффективность применения топлива, содержащего бор, снижается из-за длительных задержек воспламенения, вызванных медленны-

ми гетерогенными реакциями, связанными с удалением или модификацией оксидного слоя, покрывающего поверхность бора [8–10]. Несмотря на обширные исследования, охватывающие несколько десятилетий, процессы, связанные с задержками воспламенения бора, до настоящего времени не до конца изучены.

Авторами работы [11] показано, что химическая чистота порошков бора играет немаловажную роль при его воспламенении. Последовательная промывка порошка бора ацетонитрилом и толуолом позволяет получить более тонкое оксидное покрытие на его поверхности. В результате этого порошок становится более устойчивым на воздухе и воспламеняется быстрее, чем обычный коммерческий порошок бора [12]. Также сейчас актуальны работы по капсулированию и модифицированию поверхности бора, направленные в основном на увеличение его полноты сгорания и улучшение воспламеняемости [13, 14]. В качестве модифицирующих добавок бора, интенсифицирующих процесс его воспламенения и горения, применяется широкий спектр компонентов [15]. Особенно можно выделить порошки магния [16–19], диборида магния [20, 21], а также полимерные фторсодержащие покрытия [22–24]. Авторами работы [23] показано, что состав фторсодержащего покрытия порошков бора играет важную роль в улучшении характеристик их окисления и горения.

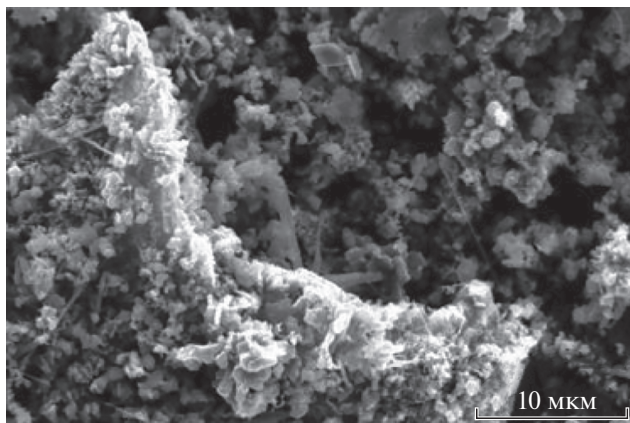


Рис. 1. Изображение образца аморфного бора марки В, полученное с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Сравнительный анализ порошков бора, полученных различными методами, показал взаимосвязь между физико-химической структурой и характером окисления порошков [25]. В то же время авторы считают, что полнота окисления определяется прежде всего суперпозицией кинетических закономерностей процессов окисления бора и испарения его оксида.

В процессе приготовления топливных композиций для оптимизации совместимости порошков бора со связующими необходимы сведения об особенностях морфологии и адсорбционных характеристиках металлического горючего [26]. Также представляет интерес проведение сравнительного анализа возможностей модифицирования различными методами порошка бора отечественного производства.

Целью данной работы было изучение текстурно-морфологических и термоокислительных свойств порошков бора, поверхность которых была подвергнута различной химической модификации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Был исследован коммерческий порошок аморфного бора марки В (BorV, ТУ 2112-001-49-53-4204-2003, АО “УНИХИМ с ОЗ”). В качестве реактивов для обработки порошков использованы ацетонитрил (Асп, ОСЧ, Химмед), 0.1 н азотная кислота (NitAc, ТУ 2642-001-33813273-97, Россия), перфторпеларгоновая кислота (PFPA, СТО 05807960-009-2013, АО “ГалоПолимер Пермь”), фторопласт марки Ф-32Л (FL, ОСТ 6-05-1620-73, АО “ГалоПолимер Пермь”), этилацетат (ЧДА, ЗАО “База № 1 Химреактивов”).

Анализ морфологии исходных и обработанных порошков бора проведен с помощью растрового электронного микроскопа FEI Quanta 650FEG с

детектором ЭДС (FEI, США). Спектры комбинационного рассеяния (КР) получали на спектрометре SENTERRA Raman microscope (Bruker, Германия) в диапазоне $100\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ с длиной волны излучения 532 нм. Спектры нормализованы к максимальному по интенсивности пику.

Удельную поверхность определяли методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ). Изотермы адсорбции и десорбции азота измерялись при температуре -196°C с использованием анализатора ASAP 2020 (Micromeritics, США), после того как образец дегазировали в вакууме при температуре 90°C в течение 2 ч.

Исследование термического поведения образцов порошков бора проведено методами сопряженного термического анализа на термоанализаторе TGA/DSC 1 (Mettler Toledo, Швейцария) в температурном интервале $250\text{--}1000^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ на воздухе. Держатель образца — тигель из оксида алюминия объемом 70 мкл. Навески образцов бора составляли 5 мг.

Морфология поверхности играет важную роль в характеристиках воспламенения и сгорания металлических частиц. Исходный образец коммерческого бора марки В (рис. 1) представляет собой различные по морфологическому строению частицы бора, которые образуют конгломераты. В образце присутствуют частицы неправильной формы размером до 5 мкм, а также частицы удлиненной игольчатой формы размером 1–10 мкм. Проведенный усредненный рентгеноспектральный микроанализ исследуемой области (60 мкм^2) показал, что порошок содержит бор (86.8%), кислород (5.9%) и магний (7.3%).

Порошки бора BorV–Асп и BorV–NitAc с модифицированными поверхностями готовили путем обработки ацетонитрилом и 0.1 н азотной кислотой соответственно. Образцы массой 5 г помещали в колбу с 10-кратным избытком растворителя (кислоты), выдерживали при комнатной температуре в течение 24 ч, затем фильтровали и сушили до постоянства массы.

Обработку порошка бора фторсодержащими соединениями проводили согласно методике из работы [27]. Образцы порошка бора массой 5 г помещали в колбу с 0.2 г фторсодержащего соединения (перфторпеларгоновая кислота или фторопласт марки Ф-32Л) и заливали 30 мл этилацетата. Полученный раствор обрабатывали в течение 3 мин ультразвуковым гомогенизатором Bandelin SONOPULS HD 3100. Удаление растворителя проводили при температуре 80°C и постоянном перемешивании до постоянства массы. Визуальная оценка влияния обработки всеми видами реагентов на морфологию порошков показала, что происходит сокращение количества частиц игольчатой формы, в то время как вид и размер агломератов и частиц остались прежними.

Для качественного анализа изотерм используется классификация изотерм по Брунауэру (или классификация по Брунауэру–Демингу–Демингу–Теллеру (БДДТ) [28], в основе которой лежит взаимосвязь формы изотермы с механизмом адсорбции. Следовательно, сопоставление экспериментально полученных данных с формой изотермы данной классификации позволяет сделать предположение о механизме адсорбции и размере пор в исследуемом материале.

Изотермы образцов порошков бора соответствуют II типу по классификации БДДТ согласно рекомендациям Международного союза по теоретической и прикладной химии (ИЮПАК) [28] (рис. 2). Текстульные характеристики образцов приведены в табл. 1.

Для изотерм II типа характерна S-образная форма, которая свидетельствует о протекании полимолекулярной адсорбции. Как правило, такая форма изотерм характерна для дисперсных макропористых и непористых материалов и согласуется с представлением о системе рыхло упакованных непористых частиц с размерами порядка нескольких микрон [29].

Отчасти изотермы также можно отнести к IV типу, так как они имеют начальный участок, схожий с аналогичным участком изотерм II типа, что свидетельствует о протекании полимолекулярной адсорбции, и участок (гистерезис в области высоких давлений), свидетельствующий о наличии капиллярной конденсации адсорбата в мезопорах.

Согласно классификации ИЮПАК в области высоких давлений все представленные петли гистерезиса можно отнести к типу H1, что соответствует пористой структуре, состоящей из плоскопараллельных частиц. В петлях типа H1 ветви адсорбции и десорбции почти вертикальны и приблизительно параллельны друг другу в оцениваемом интервале величин адсорбции.

Также необходимо отметить явление гистерезиса при низких давлениях для образцов BorV–Acn и BorV–NitAc. Согласно [28], гистерезис при низких давлениях обусловлен набуханием частиц, сопровождающим адсорбцию. Набухание разрушает структуру, например в результате разрыва слабых связей первичных частиц, и открывает

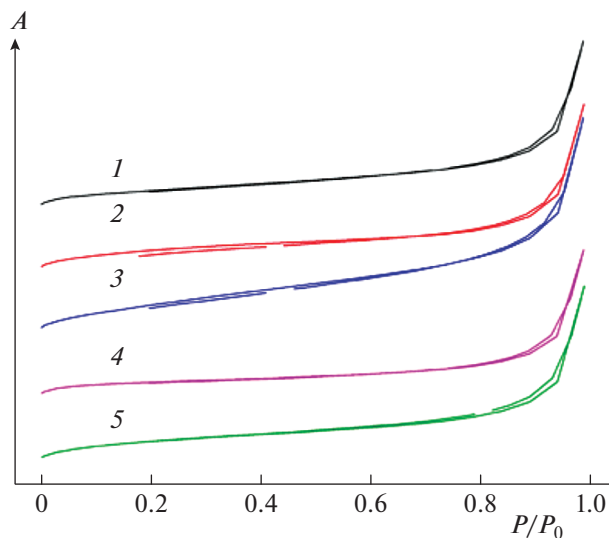


Рис. 2. Изотерма адсорбции порошков бора: 1 – BorV, 2 – BorV–Acn, 3 – BorV–NitAc, 4 – BorV–FL, 5 – BorV–PFPA.

вает доступ в полости, ранее недоступные молекулам адсорбата.

Спектроскопия КР является чувствительным инструментом для исследования фоновых спектров кристаллических твердых тел и их модификаций из-за изменений химического состава или наличия структурных дефектов. Это особенно важно в случае икосаэдрических твердых частиц с высоким содержанием бора, содержащих различные типы таких структурных дефектов [30]. Спектроскопия КР была использована для идентификации кристаллических структур бора (рис. 3). Согласно исследованиям, проведенным в работе [31], значения комбинационного сдвига, превышающие 1000 см^{-1} , соответствуют связям между икосаэдрами, а менее 1000 см^{-1} – связям внутри икосаэдров. Поскольку основной структурной единицей бора является икосаэдр, связь между икосаэдрами является важной для оценки структуры бора. Отклонения от идеальных кристаллических структур вызывают комбинационную активность мод, которые обычно неактивны. Отнесение таких комбинационных сигналов к колебаниям

Таблица 1. Текстульные характеристики образцов порошка бора

Маркировка образца	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	Общий объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Диаметр пор, нм
BorV	8.72	0.029	13.66
BorV–Acn	14.64	0.037	9.91
BorV–NitAc	9.71	0.029	12.45
BorV–PFPA	8.53	0.029	13.93
BorV–FL	6.35	0.025	18.72

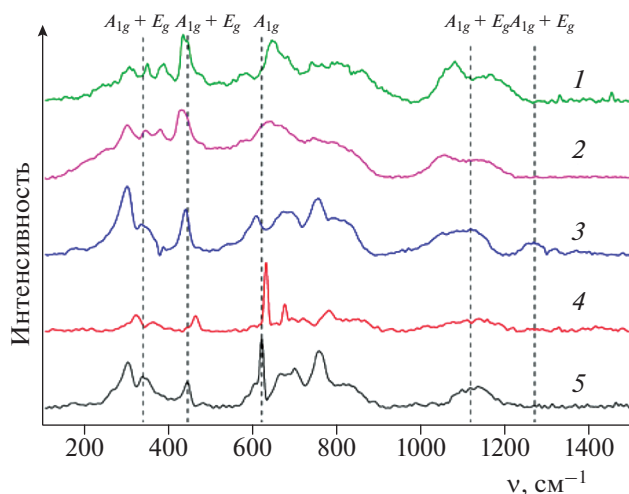


Рис. 3. Спектры КР коммерческого порошка бора марки В и образцов с поверхностной обработкой: 1 – BorV–PFPA, 2 – BorV–FL, 3 – BorV–Acn, 4 – BorV–NitAc, 5 – BorV.

определенных атомов или расположению атомов может дать информацию о конкретных структурных дефектах. Периодичность кристаллов резко обрывается на поверхности. Это изменяет объемные свойства в искаженном слое перегруппированных атомов. Поэтому адсорбированные слои на поверхности порошков бора могут внести существенный вклад в спектры [30].

Частоты КР-пиков исследованных порошков бора практически полностью соответствуют β -ромбоэдрическому бору, а также частично – частотам α -ромбоэдрического бора, согласно [30, 32]. Тем не менее общий вид спектров для всех порошков говорит об определенной степени аморфизации, так как спектры практически не содержат узких линий [33]. Модифицирование порошка бора фторсодержащими реагентами привело к некоторой флуоресценции их КР-спектров (линии 1 и 2 на рис. 3). Согласно [30], легирование бора различными добавками и наличие примесей приводят к снижению интенсивности пиков в области межкосаэдрических колебаний ($<500\text{ см}^{-1}$). Поэтому по интенсивности пиков спектра образца BorV–Acn (линия 3 на рис. 3) можно сделать заключение, что примесей стало меньше, чем в исходном порошке. Также появился пик при 1271 см^{-1} , характеризующий колебания центрального атома бора [30].

Видно сильное изменение спектра для образца BorV–NitAc. Наблюдается один интенсивный узкий пик в области внутрикосаэдрических колебаний ($500\text{--}1150\text{ см}^{-1}$), в то время как интенсивность остальных пиков значительно ослабевает.

Для оценки эффективности использования различной обработки поверхности порошка бора марки В проведены исследования термоокисли-

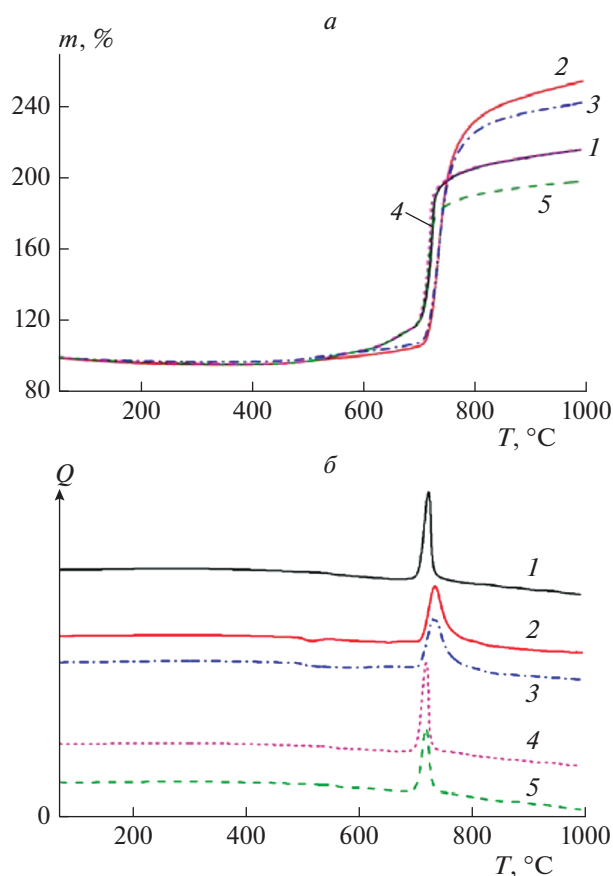


Рис. 4. Окисление образцов бора при линейном нагревании в потоке воздуха: а – измерение массы образца (ТГА), б – изменение энтальпии образцов (ДСК); обозначения кривых те же, что и на рис. 2.

тельных свойств исходного и обработанных порошков на воздухе. Эти исследования позволяют судить о реакционной способности порошков и полноте их окисления (рис. 4, табл. 2–4).

Исследование образцов бора с различной обработкой поверхности методами термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии (ТГА/ДСК) позволяет предположить, что процесс окисления протекает в три стадии. Первая стадия характеризуется незначительной потерей массы в пределах 4.5% для всех образцов бора, кроме образца BorV–NitAc (–2.68%), что можно связать со слабоэндотермической реакцией распада ортоборной кислоты [34]. Разложение перфторпеларгоновой кислоты происходит при 140°C , а фторопласта марки Ф–32Л – при 405°C [35]. Соответственно, потеря массы образца BorV–PFPA в температурном интервале $150\text{--}270^\circ\text{C}$ связана с разложением перфторпеларгоновой кислоты, а в случае с BorV–FL – с разложением фторопласта Ф–32Л в температурном интервале $300\text{--}400^\circ\text{C}$, содержание которых составляет 4% от массы образца. Также можно

Таблица 2. Характеристика термоокислительной стабильности порошков бора

Образец	Стадия	Температурный диапазон, соответствующий изменению массы, °C	Потеря/прирост массы, %	Остаток, % при 1000 °C
BorV	1	36–344	–4.5	215.6
	2	344–659	15.6	
	3	659–1000	104.5	
BorV–Acn	1	36–353	–4.2	253.9
	2	353–660	7.9	
	3	660–1000	150.8	
BorV–NitAc	1	36–341	–2.7	242.0
	2	341–660	8.4	
	3	660–1000	136.8	
BorV–PFPA	1	35–363	–4.6	198.0
	2	363–670	15.6	
	3	670–1000	87.2	
BorV–FL	1	35–383	–4.3	215.9
	2	383–660	15.9	
	3	660–1000	104.4	

Таблица 3. Сравнительная характеристика порошков бора по данным дифференциального термогравиметрического анализа

Образец	Стадия	Температура начала пика, °C	T_{max} , °C	Температура окончания пика, °C	Скорость изменения массы, %/°C
BorV	1	613	646	678	0.3
	2	705	719	728	8.9
BorV–Acn	2	711	731	748	15.0
BorV–NitAc	2	708	730	748	13.8
BorV–PFPA	1	613	656	678	0.3
	2	702	715	725	7.3
BorV–FL	1	615	643	679	0.3
	2	703	714	723	9.0

предположить, что изменение массы образцов BorV–PFPA и BorV–FL на первом этапе обусловлено малым количеством борной кислоты на поверхности порошков или присутствием покрытия, которое затрудняет ее распад.

На второй стадии происходит медленное плавление магния с его последующим окислением. По данным ДСК можно предположить, что эндопик в районе 520 °C для образца BorV–Acn связан с более ранним плавлением магния, так как по данным БЭТ удельная поверхность именно этого образца выше, чем у остальных в 1.5–2.3 раза. В случае остальных образцов, вероятнее всего, эндопик нивелировался экзоэффектом окисления. К

концу данной стадии для образцов исходного бора и бора со фторсодержащими покрытиями характерна большая степень окисления. Так, для них прирост массы составляет ~15%, в то время как для образцов бора, обработанных ацетонитрилом и азотной кислотой, он составляет ~8%. Для третьей стадии характерен резкий набор массы после 700 °C, что можно связать с началом интенсивного окисления бора. Ни один из образцов не достиг максимального изменения массы, соответствующего их полному окислению (65.83% для магния и 222% для бора).

Температуры начала интенсивного окисления и набора массы для образцов исходного бора и

Таблица 4. Сравнительная характеристика порошков бора по данным дифференциальной сканирующей калориметрии

Образец	Стадия	Температура начала пика, °C	T_{max} , °C	Температура окончания пика, °C	Величина теплового эффекта, кДж/г
BorV	1	356	359	363	–0.001
	2	617	625	635	0.02
	3	706	721	729	13.0
BorV–Acn	1	493	516	537	–0.62
	2	625	652	669	–0.19
	3	712	733	759	15.4
BorV–NitAc	1	492	538	655	–3.03
	2	709	732	760	14.9
BorV–PFPA	3	703	717	727	9.8
BorV–FL	3	704	717	725	12.0

бора с фторсодержащими покрытиями соответствуют максимумам на кривых ДСК и составляют 721, 733 и 717 °C. Наибольший тепловой эффект наблюдался для образцов порошков бора BorV–Acn и BorV–NitAc, далее следовали образцы BorV и BorV–FL. Наименьшая интенсивность тепловыделения наблюдалась для образца BorV–PFPA. Полученные данные согласуются с данными термогравиметрического анализа и свидетельствуют о большей степени окисления образцов BorV–Acn и BorV–NitAc в сравнении с BorV–FL, BorV и BorV–PFPA.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследуемых образцов порошков бора поры представляют собой зазоры между частицами скелета. Различия в пористости прежде всего обусловлены различием в упаковке первичных частиц, т.е. в числах взаимных касаний. Так, согласно данным табл. 1 можно заключить, что обработка исходного порошка бора ацетонитрилом и азотной кислотой привела к снижению среднего размера частиц. По наличию в области низких давлений петли гистерезиса (рис. 2) можно предположить, что данные порошки также будут обладать меньшей устойчивостью агломератов при последующей переработке. Насколько сильно твердое тело может расширяться при адсорбции, зависит от общей жесткости образца; для агломерированного образца (BorV, BorV–PFPA и BorV–FL), жесткость которого высока, набухание играет относительно малую роль. Адсорбционный гистерезис в области низких давлений для образцов BorV–Acn и BorV–NitAc (рис. 2) указывает на образование между частицами узких промежутков, подобных сужениям в микропорах.

Обработка исходного порошка бора растворителями с различной полярностью привела к некоторому изменению морфологии порошков. Согласно элюотропному ряду полярность растворителей возрастает в ряду этилацетат – ацетонитрил – вода [36]. Чем менее полярны растворители, тем меньше они связываются с поверхностью частиц бора. Следовательно, контакты частиц между собой становятся энергетически более выгодными в этилацетате, чем в ацетонитриле и азотной кислоте, что приводит к образованию более крупных, но рыхлых агломератов. Это согласуется с результатами определения адсорбционных характеристик. Так, удельная поверхность порошков бора, обработанных перфторпеларгоновой кислотой (8.53 м²/г) и фторопластом (6.35 м²/г), снижается при возросшей величине диаметра пор до 13.93 и 18.72 нм соответственно. Наименьшая величина общего объема пор и самое большое значение диаметра пор наблюдаются у образца BorV–FL, что позволяет предположить образование фторопластовой пленки на поверхности частично агломерированных частиц бора.

Более узкие пики КР-спектров для образцов порошков бора BorV–Acn и BorV–NitAc свидетельствуют о том, что их обработка ацетонитрилом и азотной кислотой привела к снижению количества аморфных включений в образцах, относящихся как к частицам бора аморфной модификации, так и к техническим примесям, в первую очередь содержащим магний. Этот факт также подтверждает меньшее значение величины прироста массы на второй стадии: 7.9% и 8.4% для BorV–Acn и BorV–NitAc, соответственно, по сравнению с примерно 15% для исходного порошка и порошков, обработанных фторсодержащими соединениями (табл. 3).

Высокая удельная поверхность образца порошка бора BorV–Asp по сравнению с другими образцами напрямую не влияет на его термостабильность. Характеристики данного порошка по величине начала интенсивного окисления (712°C) и величине максимального окисления (253.9%) близки к таковым для образца BorV–NitAc.

Более раннее начало окисления порошков бора BorV, BorV–PFPA, BorV–FL можно связать с содержанием фтора в данных образцах. В то же время величина теплового эффекта на третьей стадии имеет обратную зависимость от содержания фтора во фторсодержащих покрытиях, что не согласуется с данными из работы [23]. Для FL содержание фтора составляет 52.6%, для PFPA – 69.6%. Образцы BorV–PFPA, BorV–FL имеют температуру начала интенсивного окисления незначительно ниже, чем у исходного порошка, при этом обнаруживают более медленную реакцию окисления и меньшую величину степени окисления, которые с учетом пересчета на чистое содержание порошка бора заметно ниже, чем для образцов BorV–Asp и BorV–NitAc. Поведение модифицированных порошков при горении в составе энергетических конденсированных систем требует дальнейшего изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена обработка порошка бора марки В ацетонитрилом, азотной кислотой и фторсодержащими соединениями – перфторпеларгоновой кислотой, фторопластом марки 32Л. Обработка исходного порошка бора ацетонитрилом и 0.1 н азотной кислотой позволяет получить порошки, которые содержат меньшее количество оксидного слоя на поверхности, более термостабильны и наиболее полно окисляются при нагревании. Фторсодержащие соединения не привели к заметным изменениям текстурно-морфологических свойств исходного порошка и не оказывают существенного влияния на соотношение аморфной и кристаллической фаз.

Авторы выражают благодарность Д.М. Киселькову (“ИТХ УрО РАН”) за проведение исследований порошков бора методом КР-спектроскопии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “Исследования материалов и вещества” ПФИЦ УрО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-33-00170.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р.А. // Успехи химии. 2015. Т. 84. № 5. С. 540; <https://doi.org/10.1070/RCR4469>
2. Махов М.Н. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 1. С. 40; <https://doi.org/10.7868/S0207401X15010082>
3. Kondo T. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2017. V. 18. P. 780; <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1379856>
4. King M.K. // Combust. Sci. Technol. 1972. V 5. P. 155; <https://doi.org/10.1080/00102207208952516>
5. Young G., Stoltz C.A., Mason B.P. et al. // Intern. J. Energetic Mater. Chem. Propul. 2012. V. 11. P. 451; <https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChem-Prop.2013005791>
6. Young G., Stoltz C.A., Mayo D.H. et al. // Combust. Sci. Technol. 2013. V. 185. P. 1261; <https://doi.org/10.1080/00102202.2013.787417>
7. Maček A., Semple J.M. // Combust. Sci. Technol. 1969. V. 1. № 1. P. 181.
8. Chen D.M., Hsieh W.H., Snyder T.S. et al. // J. Propul. Power. 1991. V. 7. P. 250; <https://doi.org/10.2514/3.23318>
9. Foelsche R.O., Burton R.L., Krier H. // Combust. and Flame. 1999. V. 117. P. 32; [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(98\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(98)00080-7)
10. Yeh C.L., Kuo K.K. // Prog. Energy Combust. Sci. 1996. V. 22. P. 511; [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(96\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(96)00012-3)
11. Liu X., Gonzales J., Schoenitz M. et al. // Thermochim. Acta. 2017. V. 652. P. 17; <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.03.007>
12. Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E.L. // Combust. and Flame. 2016. V. 173. P. 288; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.08.027>
13. Chintersingh K.-L., Sun Y., Schoenitz M., Dreizin E.L. // Thermochim. Acta. 2019. V. 682. P. 178415; <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178415>
14. Cheng L., Yang H., Yang Y. et al. // Combust. and Flame. 2020. V. 211. P. 456; <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.10.017>
15. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А., Архипов В.А. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080>
16. Sandall E.T., Kalman J., Quigley J.N. et al. // Propul. Power Res. 2017. V. 6. № 4. P. 243; <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2017.11.004>
17. Liu X., Chintersingh K.L., Schoenitz M., Dreizin E.L. // J. Propul. Power. 2018. P. 1; <https://doi.org/10.2514/1.B36315>
18. Крупин В.Г., Шмелев В.М. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 12. С. 53; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20120079>
19. Крупин В.Г., Шмелев В.М., Николаев В.М., Финяков С.В. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 24; <https://doi.org/10.1134/S0207401X19080077>
20. Shin K.-H., Yu K., Gupta A.K. // AIAA Propul. and Energy 2019 Forum. AIAA 2019-4125; <https://doi.org/10.2514/6.2019-4125>
21. Guo Y., Zhang W., Zhou X. et al. // J. Therm. Anal. Calorim. 2013. V. 113. P. 787; <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10973-012-2832-2>
22. Young G., Roberts C.W., Stoltz C.A. // J. Propuls. Power. 2015. V. 31. № 1. P. 386-392. <https://doi.org/10.2514/1.B35390>

23. *Keerthi V., Nie H., Pisharath S., Hng H.H.* // Combust. Sci. Technol. 2020. V. 192;
<https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1804885>
24. *Лебедева Е.А., Тутубалина И.Л., Вальцифер В.А. и др.* // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 6. С. 41;
<https://doi.org/10.1134/S0010508212060056>
25. *Пивкина А.Н., Муравьев Н.В., Моногаров К.А. и др.* // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 4. С. 73;
<https://doi.org/10.15372/FGV20180409>
26. *Рябина А.В., Шевченко В.Г.* // ЖФХ. 2018. Т. 92. № 11. С. 1771;
<https://doi.org/10.1134/S0044453718110341>
27. *Лебедева Е.А., Ухин К.О., Астафьева С.А. и др.* // Перспективные материалы. 2014. № 3. С. 72;
<https://doi.org/10.30791/1028-978X>
28. *Грег С., Синг К.* Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость. Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. С. 245.
29. *Рябина А.В., Шевченко В.Г.* // ЖФХ. 2020. Т. 94. № 11. С. 1678;
<https://doi.org/10.31857/S004445372011028X>
30. *Helmut W., Filipov V., Kuhlmann U. et al.* // Sci. Technol. Adv. Mater. 2010. V. 11. P. 250;
<https://doi.org/10.1088/1468-6996/11/2/023001>
31. *Parakhonskiy G., Dubrovinskaia N., Dubrovinsky L. et al.* // J. Crystal Growth. 2011. V. 321 P. 162;
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.02.036>
32. *Zhao S., Wu Y., Zhou B., Liu X.* // Sci. Rep. 2019. V. 9;
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-53851-6>
33. *Jain A., Ghosh C., Ravindran T. R. et al.* // Bull. Mater. Sci. 2013. V. 36. № 7. P. 1323;
<https://doi.org/10.1007/s12034-013-0587-4>
34. *Пивкина А.Н., Мееров Д.Б., Моногаров К.А. и др.* // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 2. С. 148;
<https://doi.org/10.1134/s0010508220020057>
35. *Valluri S.K., Schoenitz M., Dreizin E.* // Defence Technol. 2019. V. 15. № 1. P. 1;
<https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.001>
36. *Отто М.* Современные методы аналитической химии. Пер. с нем. / Под ред. Гармаша А.В. Т. 2. М.: Техносфера, 2003.