

**УЛЕТУЧИВАНИЕ БОРНОЙ КИСЛОТЫ, ОБРАЗОВАННОЙ  
НА ПОВЕРХНОСТИ КОМПАКТИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ  
СВС-СИСТЕМЫ БОР – ТИТАН**

**В.И. Зюбанова, О.В. Титова, Л.П. Кочегарова, А.В. Ершов, В.Н. Борисов,  
Ю.Г. Смирнов, О.В. Лысенко, Е.В. Седов**

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия*  
✉ [evsedov@vniitf.ru](mailto:evsedov@vniitf.ru)

**Аннотация.** В основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) лежит явление горения компактированной смеси реагентов (бор и титан) в твёрдой фазе – твёрдо-пламенное горение. Горение компактированной смеси инициируется, как правило, локальным импульсным подведением тепловой энергии к объекту (касание накалившимся телом, электродуговой разряд, поток лучистой энергии и др.), далее горение распространяется и поддерживается за счёт тепла экзотермической химической реакции. При инициировании СВС-системы бор – титан, были зафиксированы случаи невоспламенения (снижение чувствительности к поджигу), связанные с наличием на поверхности компактированного образца кристаллов ортоборной кислоты ( $H_3BO_3$ ), которые увеличивают время задержки зажигания. Целью данной работы являлось исследование процесса улетучивания борной кислоты, образованной на поверхности образцов компактированной СВС-системы бор – титан.

В статье представлены результаты исследования поверхностного слоя компактированной СВС-системы бор – титан методами оптической, электронной микроскопии, ИК-Фурье спектральным анализом. По результатам исследований показано, что на поверхности образца СВС-системы бор – титан в процессе хранения в нормальных климатических условиях образуется некоторое количество метаборной кислоты ( $HBO_2$ ). Микрокристаллы метаборной кислоты, присутствующие в поверхностном слое образца СВС-системы бор – титан, вероятно, являются зародышами (центрами роста) относительно крупных кристаллов ортоборной кислоты. На основании проведенных исследований была отработана технология дегидратации кристаллов борной кислоты, расположенных на поверхности компактированного образца СВС-системы бор – титан, что позволило восстановить чувствительность СВС-системы бор – титан к воспламенению посредством локального импульсного подведения тепловой энергии.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, титан, аморфный бор, ортоборная кислота, дегидратация, оптическая и электронная микроскопия, ИК-Фурье спектральный анализ

**Для цитирования:** Улетучивание борной кислоты, образованной на поверхности компактированных образцов СВС-системы бор – титан / В.И. Зюбанова, О.В. Титова, Л.П. Кочегарова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 1. С. 66–74. DOI: 10.14529/chem260108

## VOLATILIZATION OF BORIC ACID FORMED ON THE SURFACE OF COMPACTED SAMPLES OF THE BORON–TITANIUM SHS-SYSTEM

V.I. Zyubanova, O.V. Titova, L.P. Kochegarova, A.V. Ershov, V.N. Borisov,  
Yu.G. Smirnov, O.V. Lysenko, E.V. Sedov<sup>✉</sup>

Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research  
Institute of Technical Physics named after Academician E.I. Zababakhin”, Snezhinsk, Russia  
<sup>✉</sup>evsedov@vniitf.ru

**Abstract.** Self-propagating high-temperature synthesis (SHS) is based on solid-flaming combustion of a compacted mixture (boron and titanium) in the solid phase.

Compacted mixture combustion is generally initiated by local pulsed heat supply to the object (glowing solid contact, electric arc, radiant energy flow, etc.), further combustion propagates and is supported by exothermic chemical reaction heat. In some cases the absence of ignition was observed in the initiation of the boron–titanium SHS-system (deterioration of sensitivity to ignition). This phenomenon is caused by the presence of boric acid crystals on the compacted sample surface. The boric acid crystals significantly increase the ignition delay time. The aim of the present research is the investigation of boric acid volatilization process on the boron–titanium compacted SHS sample surface.

Boron–titanium compacted SHS sample surface has been analyzed by optical and electron microscopy and by infrared spectrometry. The analysis results show that some amount of meta boric acid ( $\text{HBO}_2$ ) is formed on the boron–titanium compacted SHS sample surface under normal climatic storage conditions.

Microcrystals of meta boric acid ( $\text{HBO}_2$ ) present in the surface layer of boron–titanium compacted SHS samples, probably are nuclei (growth centers) of relatively large boric acid ( $\text{HBO}_3$ ) crystals. We have developed the volatilization technology of boric acid crystals on the boron–titanium compacted SHS sample surface. This technology has allowed recovering sensitivity of boron–titanium SHS-system to ignition by means of local pulsed heat supply.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, titanium, amorphous boron, boric acid, dehydration, optical microscopy, electron microscopy, infrared spectrometry

**For citation:** Zyubanova V.I., Titova O.V., Kochegarova L.P., Ershov A.V., Borisov V.N., Smirnov Yu.G., Lysenko O.V., Sedov E.V. Volatilization of boric acid formed on the surface of compacted samples of the boron–titanium SHS-system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(1):66–74. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260108

### Введение

В основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) лежит явление горения компактированной смеси реагентов (В и Тi) в твёрдой фазе – твёрдопламенное горение. Горение компактированной смеси инициируется, как правило, локальным импульсным подведением тепловой энергии к объекту (касание накалившимся телом, электродуговой разряд, поток лучистой энергии и др.), далее горение распространяется и поддерживается за счёт тепла экзотермической химической реакции [1–4]. При инициировании СВС-системы бор – титан, были зафиксированы случаи невоспламенения (снижение чувствительности к поджигу), связанные с наличием на поверхности компактированного образца кристаллов борной кислоты, которые увеличивают время задержки зажигания.

СВС-система бор – титан представляет собой механическую смесь порошкообразных титана и бора аморфного, которую перед инициированием предварительно компактируют, как правило, методом одноосного прессования. Взаимодействие титана с бором аморфным происходит по типу безгазового СВС с промежуточным расплавленным слоем, при котором в волне горения появляется жидкая фаза, а продукт образуется в твёрдом состоянии. Для компактированных образцов СВС-систем (например, система Ti+2B) в процессе горения происходит разрыхление и значительное увеличение длины образца в ~ 1,7 раза. Данный эффект объясняется выделением газооб-

разных примесей (водорода, окиси бора, борной кислоты) в волне горения, температура в которой превышает температуры плавления реагентов (В и Ti) [1, 5].

В процессе иницирования СВС воспламенение бора существенно замедляется из-за наличия оксидного слоя на поверхности его частиц [6–8], в том числе и из-за борной кислоты, которая выполняет функцию энергетической ловушки. Помимо изменения размера и пористости образца, газифицирующие примеси могут приводить к нестационарному режиму горения и к необходимости затратить большее количество энергии для иницирования – всё это оказывает негативное влияние на стабильность конечного результата СВС-синтеза: будь то передача теплового импульса или изготовление изделий прямым методом [1, 9].

Наличие прозрачных кристаллов борной кислоты на поверхности компактированного образца СВС-системы бор – титан объясняется химическими свойствами бора аморфного. По мнению авторов [10, 11] аморфный бор медленно окисляется на воздухе даже при комнатной температуре, образуя  $B_2O_3$ . Частичная окисленность поверхности частиц даже самых чистых образцов аморфного бора обуславливает его значительную гидрофильность. Бор образует с кислородом соединения разной степени окисленности [12–14], однако наиболее распространёнными из них является  $B_2O_3$  и соответствующие ему кислоты.  $B_2O_3$  – гигроскопическое вещество, при гидролизе которого на воздухе первоначально образуется  $HBO_2$ , при дальнейшем гидролизе  $HBO_2$  переходит в  $H_3BO_3$  по реакции [15, 16]:



$H_3BO_3$  – летучая слабая неорганическая кислота, существует в виде бесцветных, белых шестигранных пластинок – чешуек. Даже из концентрированных растворов, равновесных с твёрдой  $HBO_2$ , улетучивание происходит в форме  $H_3BO_3$ . Чрезвычайно низкая летучесть  $HBO_2$  и  $B_2O_3$  объясняется координационной ненасыщенностью в мономолекулярном состоянии [17, 18].

При нагревании до 50 °С  $H_3BO_3$  не теряет воду, но уже при температуре 70–100 °С по разным источникам [19, 20] заметно обезвоживается, причём образуется  $HBO_2$ . Конечным продуктом обезвоживания  $H_3BO_3$  при температуре не менее 230 °С является  $B_2O_3$ . Температура плавления  $H_3BO_3$  с разложением равна 169 °С.

В работе [21] исследованы термические превращения  $H_3BO_3$  при нагревании её в вакууме. Отмечено, что термообработка смеси порошков  $H_3BO_3$  с борным ангидридом приводит к образованию  $\beta$ - $HBO_2$ , а при термообработке порошка  $H_3BO_3$  образуется смесь  $\alpha$ - и  $\beta$ - $HBO_2$ , которые неустойчивы при хранении и в присутствии паров воды обратно переходят в  $H_3BO_3$ . При хранении  $H_3BO_3$  сама поглощает и прочно удерживает за счёт водородных связей небольшое количество воды, однако это является обратимым процессом.

Цель данной работы – исследование процесса и выбор режимов улетучивания  $H_3BO_3$  с поверхности компактированных образцов СВС-системы бор – титан.

### Экспериментальная часть

Для изготовления образцов СВС-системы бор – титан использовали порошок титана и бор аморфный марки Б-99А. Дегазация бора аморфного перед приготовлением СВС-системы бор – титан была подробно описана нами в [22]. Далее подготовленный бор аморфный и титан в состоянии поставки смешивали и запрессовывали, получая образцы цилиндрической формы. В процессе хранения (до 7 суток) в нормальных климатических условиях (н.к.у.) на поверхности образцов появлялись прозрачные кристаллы, которые исследовали с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. Химический элементный состав кристаллов определён методом локального рентгеноспектрального микроанализа.

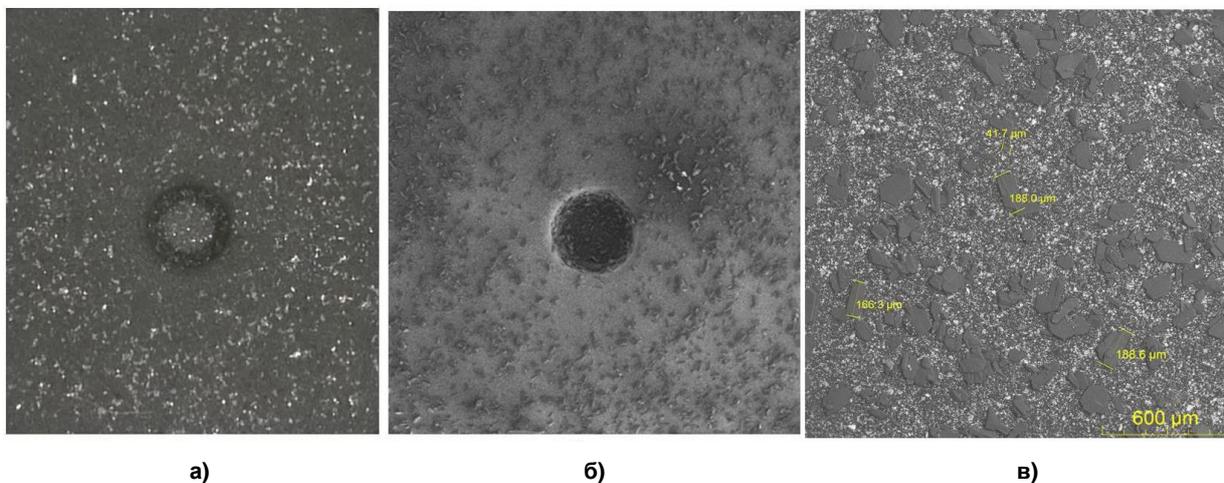
Исследование химического состава и структуры поверхностного слоя образцов проводили на ИК-Фурье спектрометре с приставками нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в рабочем диапазоне волновых чисел (4000–800)  $cm^{-1}$  и диффузного отражения (ДО) в рабочем диапазоне волновых чисел (4000–650)  $cm^{-1}$ .

Процесс дегидратации  $H_3BO_3$  проводили при температурах от 80 до 250 °С в сушильном вакуумном шкафу при остаточном давлении не выше 1,17 кПа, время выдержки – 3 и 10 ч. Определяли изменение массы с помощью аналитических весов, изменение внешнего вида образцов (наличие кристаллов) фиксировали с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов.

### Обсуждение результатов

#### Поверхностный слой образца СВС-системы бор – титан

Снимки поверхностного слоя образца СВС-системы бор – титан, полученные на оптическом и сканирующем электронном микроскопах, приведены на рис. 1.

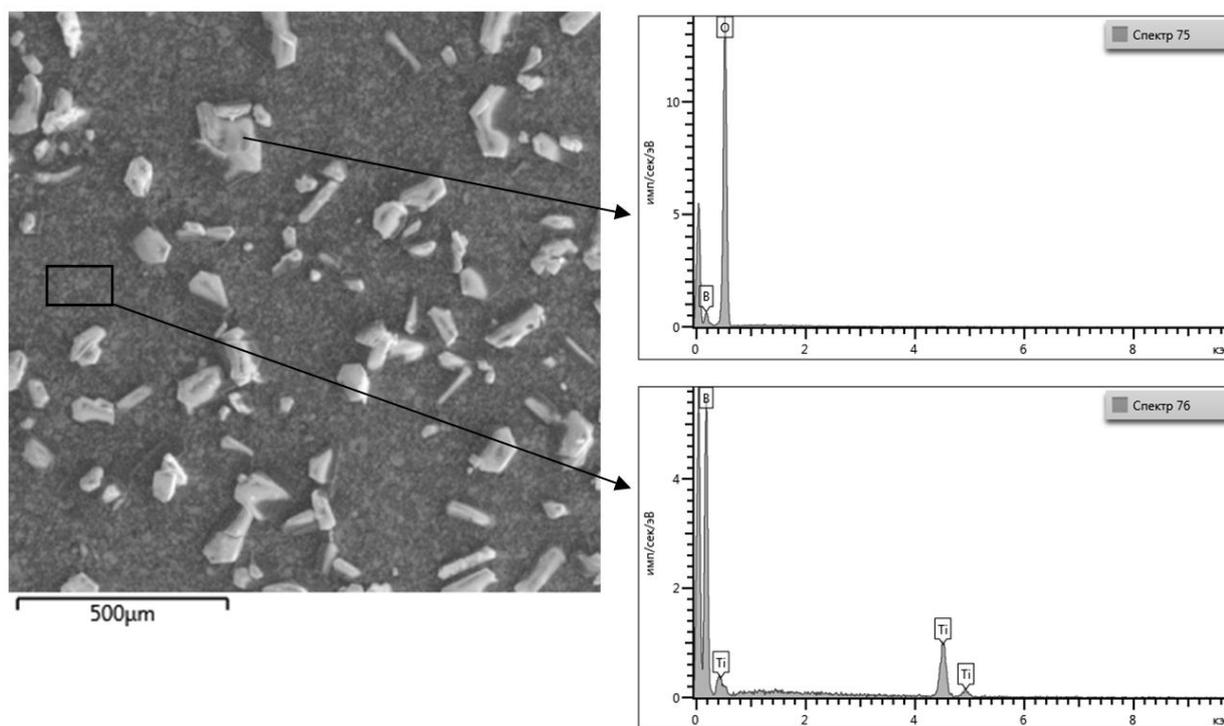


а) б) в)

**Рис. 1. Снимки поверхностного слоя образца СВС-системы бор – титан:  
а – оптический снимок, б – снимок во вторичных электронах, в – снимок в отражённых электронах**

На снимках видно, что поверхность образца покрыта прозрачными кристаллами, которые равномерно распределены по всей поверхности (рис. 1а, б). Размер кристаллов составляет от 40 до 200 мкм (рис. 1в).

Химический элементный анализ показал, что в состав кристаллов входят бор и кислород (рис. 2, спектр 75). В спектре с поверхности образца, свободного от кристаллов, регистрируются линии, принадлежащие бору и титану (рис. 2, спектр 76).



**Рис. 2. Снимок во вторичных электронах поверхности образца СВС-системы бор – титан и рентгеновские спектры с различных участков анализа**

На рис. 3 приведен снимок во вторичных электронах образца после локального удаления поверхностного слоя СВС-системы бор – титан. Видно, что прозрачные кристаллы присутствуют только на поверхности образца.

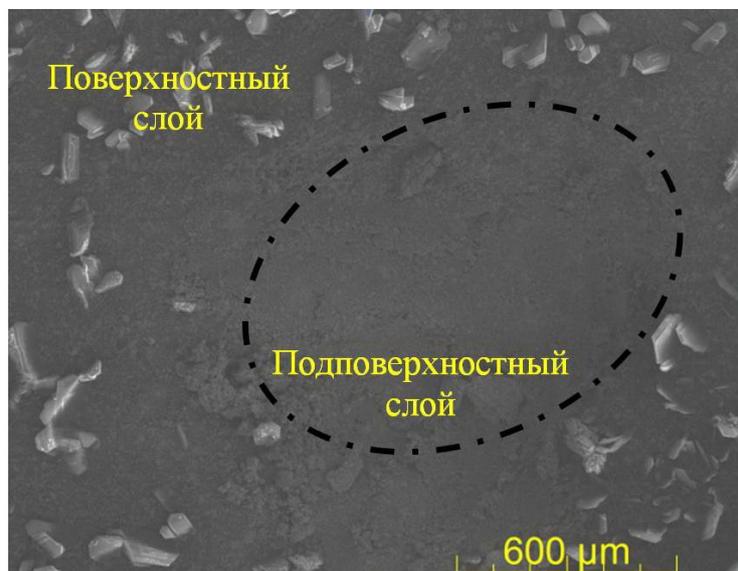


Рис. 3. Снимок во вторичных электронах поверхности образца СВС-системы бор – титан

Результаты ИК-Фурье спектрального анализа прозрачных кристаллов, обнаруженных на поверхности образцов СВС-системы бор – титан, представлены на рис. 4. В спектре НПВО прозрачных кристаллов, отобранных с поверхности образца СВС-системы бор-титан (рис. 4, кривая 1), присутствует набор полос поглощения,  $\text{см}^{-1}$ : 880, 1190, 1410, 3200, характерных для колебаний связей групп оксидных форм бора и борной кислоты (В-О, В-ОН) [23–25]. Аналогичный набор полос поглощения присутствует в спектрах борного ангидрида  $\text{B}_2\text{O}_3$  (рис. 4, кривая 2), который в н.к.у. сорбирует влагу и образует на своей поверхности соединения с химическими связями В-ОН, колебания которых характерны для полосы поглощения  $3200 \text{ см}^{-1}$ , с дальнейшим образованием  $\text{HBO}_2$  и  $\text{H}_3\text{BO}_3$  [10].

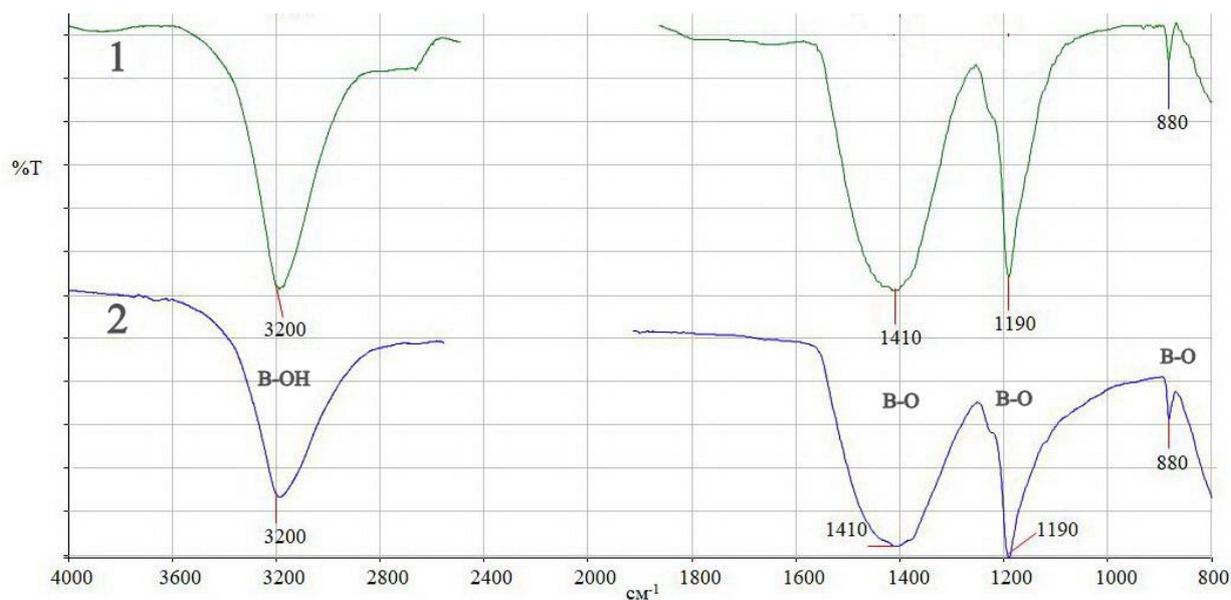


Рис. 4. Спектры НПВО: 1 – прозрачные кристаллы, взятые с поверхностного слоя образца СВС-системы бор – титан; 2 – борный ангидрид ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) осч ТУ 6-09-3558-78 (образец сравнения)

По результатам проведённых исследований можно сделать вывод, что наблюдаемые прозрачные кристаллы – это смесь кислот  $\text{HBO}_2$  и  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Микрокристаллы  $\text{HBO}_2$ , присутствующие на поверхностном слое образцов, вероятно, являются зародышами (центрами роста) относительно крупных кристаллов  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , которые образуются и растут вследствие поглощения паров воды из окружающей среды. Спектральные линии борного ангидрида и  $\text{HBO}_2$  наблюдаются и в боре аморфном (рис. 5), что указывает на присутствие борного ангидрида и  $\text{HBO}_2$  в боре аморфном в качестве примеси. Это подтверждает тот факт, что кристаллы борной кислоты  $\text{H}_3\text{BO}_3$  появляются на поверхности уже запрессованного образца СВС-системы бор – титан.

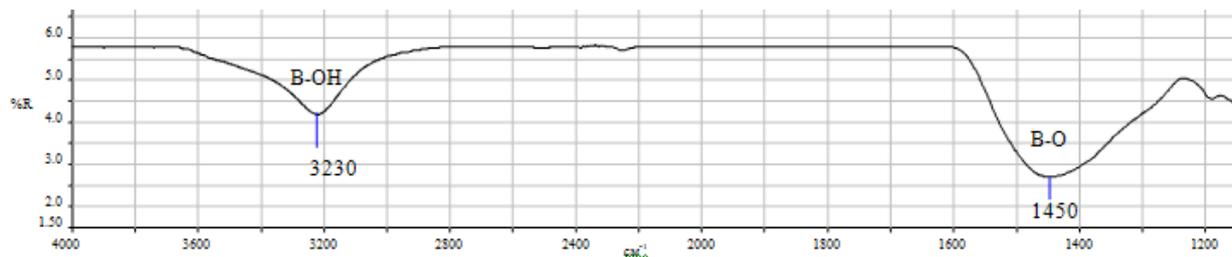


Рис. 5. Спектры ДО образца бора аморфного после дегазации непосредственно перед приготовлением СВС-системы бор – титан

#### Улетучивание ортоборной кислоты

Для выбора режима дегидратации с целью улетучивания кристаллов смеси кислот  $\text{HBO}_2$  и  $\text{H}_3\text{BO}_3$  на поверхности образцов СВС-системы бор – титан было проведено исследование по определению убыли массы  $\text{H}_3\text{BO}_3$  при разных температурах.

Результаты наблюдения за изменением массы образцов  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , хч ГОСТ 9656-75, после дегидратации приведены на рис. 6.

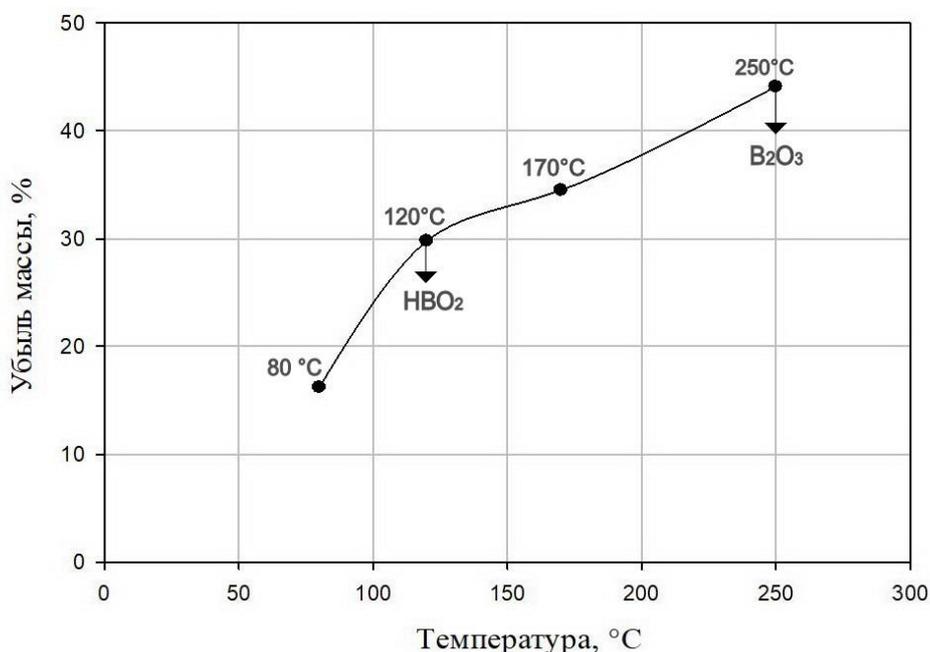


Рис. 6. Изменение массы образцов ортоборной кислоты  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , хч ГОСТ 9656-75, после дегидратации в течение 3 часов

Убыль массы образцов ортоборной кислоты  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , хч ГОСТ 9656-75, в процессе дегидратации при остаточном давлении 1,17 кПа в течение 3 часов происходит интенсивнее с увеличением температуры. В процессе выдержки  $\text{H}_3\text{BO}_3$  при температуре 80 °C происходит убыль массы образца на 16,2 %; 120 °C – 29,8 %; 170 °C – 34,5 % и 250 °C – 44,1 % соответственно. Показано, что

все опробованные режимы улетучивания  $\text{H}_3\text{BO}_3$  имеют эффект, однако 3 часов для взятых навесок (~ 10 г)  $\text{H}_3\text{BO}_3$  недостаточно.

### Дегидратация образцов СВС-системы бор – титан

Режимы дегидратации образцов СВС-системы бор – титан (температуру и длительность выдержки) выбирали с учётом химических свойств титана и на основе экстраполяции данных изменения массы ортоборной кислоты.

Дегидратацию образцов СВС-системы бор – титан проводили в сушильном вакуумном шкафу при температуре 120 °С и остаточном давлении 1,17 кПа в течение 10 часов. Выбор температуры обусловлен химическими свойствами частиц титана, так как при температуре выше 125 °С скорость окклюзии водорода титаном возрастает [26]. Наличие и размер кристаллов фиксировали на снимках, сделанных с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов. Снимки представлены на рис. 7б, где отчетливо видно, что прозрачные кристаллы смеси кислот  $\text{HBO}_2$  и  $\text{H}_3\text{BO}_3$  на поверхности образца СВС-системы бор – титан отсутствуют.

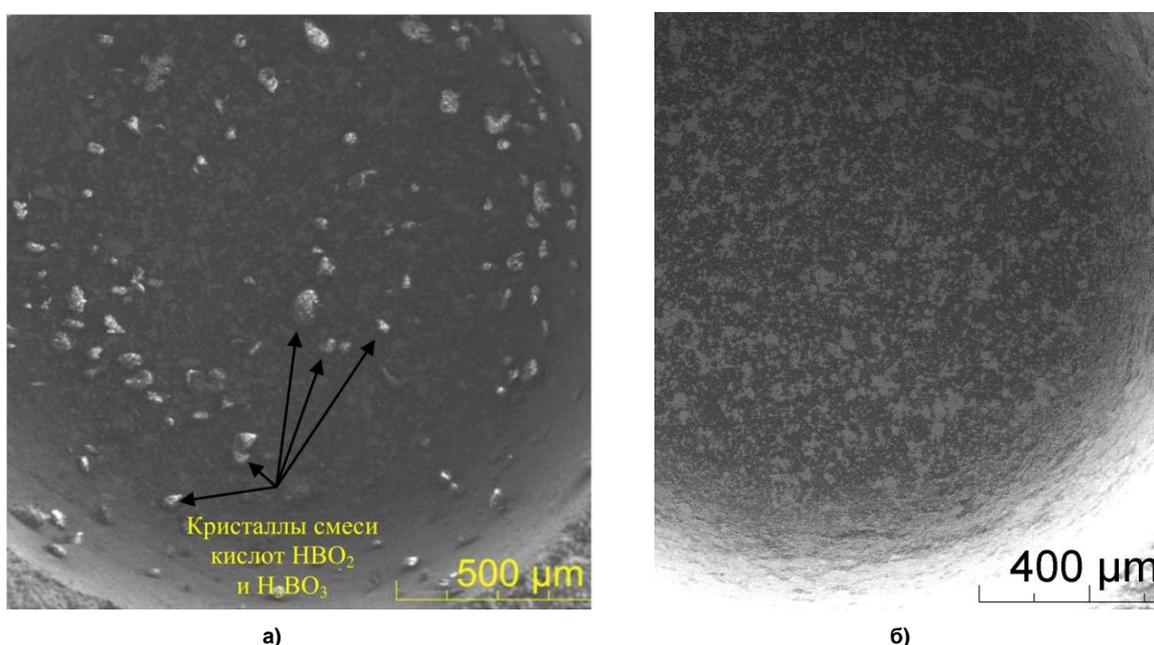


Рис. 7. Снимки поверхности образца СВС-системы бор – титан а) до дегидратации, б) после дегидратации в течение 10 ч

В спектре ДО образца поверхностного слоя СВС-системы бор – титан (после 10-часовой дегидратации) (рис. 8), присутствует набор полос поглощения,  $\text{см}^{-1}$ : 825, 1100, 1410, 3220, характерных для колебаний связей групп оксидных форм бора (B-O, B-OH) (рис. 4, кривая 2) и гидроксильных групп B-OH в следовых количествах [10, 23–25].

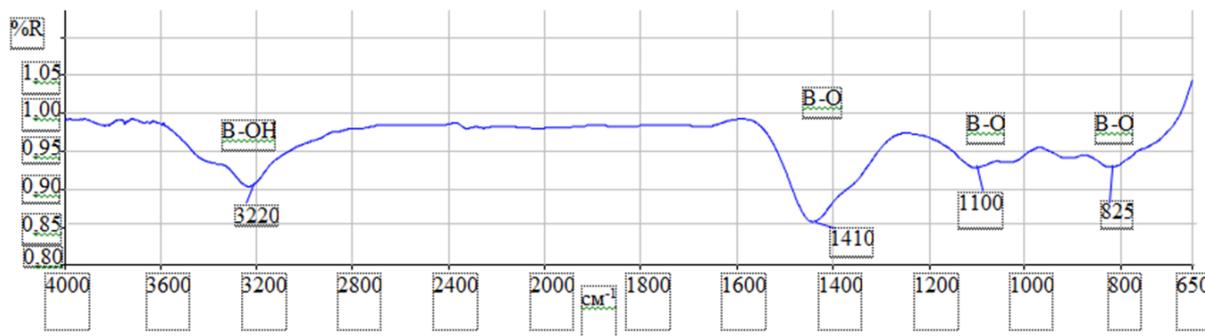


Рис. 8. Спектр ДО поверхностного слоя образца СВС-системы бор – титан после 10-часовой дегидратации

Эффективность выбранного режима улетучивания ортоборной кислоты  $H_3BO_3$  с поверхности компактированных образцов СВС-системы бор – титан подтверждали на 10 образцах посредством оценки их чувствительности к поджигу. По результатам инициирования все 10 образцов СВС-системы бор – титан воспламенились, затухание СВС не наблюдалось.

### Заключение

По результатам экспериментов отмечено, что на поверхности компактированных образцов СВС-системы бор – титан в процессе хранения в н.к.у. образуется некоторое количество  $HBO_2$ . Микрорекристаллы  $HBO_2$ , присутствующие на поверхностном слое образцов, вероятно, являются зародышами (центрами роста) относительно крупных кристаллов  $H_3BO_3$ , которые образуются и растут вследствие поглощения паров воды из окружающей среды.

В ходе дегидратации при температуре 120 °С в течение 10 часов происходит улетучивание борной кислоты с поверхности образцов, что подтверждается снимками с электронного микроскопа и ИК-спектрами.

Данная технология рекомендована для применения в н.к.у. при приготовлении СВС-систем бор – титан, а также для восстановления исходных свойств СВС-систем бор – титан после длительного хранения. Применение технологии предварительной дегидратации образцов позволяет повысить стабильность протекания процесса инициирования СВС-системы.

Авторы выражают благодарность коллегам, принимавшим участие в проведении исследований: С.Н. Киселёву, А.С. Серикову, В.А. Куликову, Н.В. Морозовой.

### Список источников

1. Мерджанов А.Г., Мукасян А.С. Твердопламенное горение. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2007. 336 с.
2. Амосов А.П., Боровинская И.П., Мерджанов А.Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов. М.: Машиностроение-1, 2007. 567 с.
3. Kostin S.V., Strunina A.G. // Combustion, explosion, and shock waves. V. 15, No. 5. 1979. P. 569. DOI: 10.1007/bf00740585.
4. Струнина А.Г., Ермаков В.И., Костин С.В. и др. // ФГФ. 1981. № 4. С. 3.
5. Ponomarev M.A., Sapronov Y.A. // Combustion, explosion, and shock waves. 2010. V. 46, No. 6. P. 100. DOI: 10.1007/s10573-010-0093-6.
6. Ao W., Zhou J. H., Yang W. J. et al. // Combustion, explosion, and shock waves. 2014. V. 50, No. 6. P. 47. EDN: SYTSCN.
7. Lebedeva E.A., Astaf'eva S.A., Istomina T.S. // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2022. V. 16, No. 2. P. 24. DOI: 10.1134/S1990793122010109.
8. Сафанеев Д.З., Кашипов Л.Я., Григорьев Ю.М. // ФГВ. 1981. № 2. С. 109.
9. Гусейнов Ш.Л., Федоров С.Г. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 256 с.
10. Самсонов Г.В., Марковский Л.Я., Хигач А.Ф., Валяшко М.Г. Бор, его соединения и сплавы. Киев: АН УССР, 1960. 590 с.
11. Марковский Л.Я., Твердовский И.П., Мазур З.Н. Труды конференции по химии бора и его соединений. М. 1958. С. 90.
12. Pivkina A.N., Muravyev N.V., Monogarov K.A. et al. // Combustion, explosion, and shock waves. 2018. V. 54, No. 4. P. 73. DOI: 10.1134/S0010508218040093.
13. Александров Е.Н., Козлов С.Н., Кузнецов Н.М. // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 6. С. 14.
14. Александров Е.Н., Козлов С.Н., Кузнецов Н.М. и др. // Хим. физика. 2003. Т. 22, № 12. С. 21.
15. Zenkov V.S. // Powder Metall. Met. Ceram. 2006. V. 45, No. 5/6. P. 79. DOI: 10.1007/S11106-006-0076-Z.
16. Григорьев А.И., Григорьева И.Д., Сигимов В.И. // ФГВ. 1976. № 1. С. 52.
17. Реми Г. Курс неорганической химии: в 2 т.: пер. с нем. М.: Мир, Т. 1. 1963. 920 с.
18. Григорьев А.И., Сигимов В.И., Григорьев И.Д. // ФГВ. 1974. № 4. С. 539.
19. Кнуляни И.Л. и др. Краткая химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, Т. 1: А–Е. 1961. 1262 с.

20. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчётам (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
21. Григоровская В.А., Шашкин Д.П., Западинский Б.И. // Химическая физика. 2009. V. 28, No. 8. P. 72.
22. В.Н. Борисов, В.И. Зюбанова и др. // Атомный проект. 2017. № 26. С. 30.
23. Кросс А. Введение в инфракрасную спектроскопию. М.: Изд. иностр. литер. 1961. 109 с.
24. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Пер. с англ. М.: Мир, 2006. 438 с.
25. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 328 с.
26. Галактионова Н.А. Водород в металлах. М.: Metallurgizdat, 1959, 256 с.

**Зюбанова Валентина Игоревна** – научный сотрудник, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: ZyuVal@yandex.ru

**Титова Ольга Васильевна** – научный сотрудник, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: smachnajaolga@rambler.ru

**Кочегарова Людмила Петровна** – начальник группы, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: lkotch@mail.ru

**Ершов Александр Викторович** – инженер-исследователь 1 категории, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: suslik20007@mail.ru

**Борисов Виктор Николаевич** – доктор технических наук, заместитель начальника технологического отделения по НИР и ОКР, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: bvn@vniitf.ru

**Смирнов Юрий Геннадьевич** – заместитель начальника технологического отделения, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: yu.smirnov@vniitf.ru

**Лысенко Ольга Витальевна** – начальник отдела, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: olgalov.1@yandex.ru

**Седов Евгений Владимирович** – кандидат технических наук, начальник отдела, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия. E-mail: evsedov@vniitf.ru

*Статья поступила в редакцию 5 ноября 2025 г.  
The article was submitted 5 November 2025.*