



УДК 533.583.2:544.478.32

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2026-1-71-77>

Научная статья

Research article



Изучение адсорбционно-структурных характеристик бора, поверхностно модифицированного пентаоксидом ванадия

А. В. Рябина[✉], В. Г. Шевченко, В. Н. КрасильниковИнститут химии твердого тела УрО РАН
Россия, 620990, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91[✉ anna-ryabina@yandex.ru](mailto:anna-ryabina@yandex.ru)

Аннотация. С помощью комплекса методов, включающего низкотемпературную адсорбцию азота, растровую электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ и др., исследованы дисперсный состав и морфология частиц порошков аморфного бора, пентаоксида ванадия и бора, модифицированного 2 мас. % пентаоксида ванадия. Изотермы адсорбции рассмотрены с позиции их соответствия изотермам по классификации С. Брунауэра, Л. Деминга, У. Деминга и Э. Теллера (БДДТ), а также определенному виду пористости, что необходимо для понимания области дальнейшего применения порошков. Показано, что тип химической связи в адсорбенте, его структура и особенности формирования поверхности в процессе модифицирования влияют на адсорбционно-структурные характеристики синтезированного образца и позволяют изменять его текстурные параметры.

Ключевые слова: пористость, удельная поверхность, пентаоксид ванадия, порошок бора, модификатор, тип химической связи

Благодарности: Работа выполнена по госбюджетной теме № 124020600007-8 блок 2.

Для цитирования: Рябина А.В., Шевченко В.Г., Красильников В.Н. Изучение адсорбционно-структурных характеристик бора, поверхностно модифицированного пентаоксидом ванадия. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2026;20(1):71–77. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2026-1-71-77>

Adsorption and structural characteristics of boron surface-modified with vanadium pentoxide

A. V. Ryabina[✉], V. G. Shevchenko, V. N. KrasilnikovInstitute of Solid State Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
91 Pervomaiskaya Str., Ekaterinburg 620990, Russia[✉ anna-ryabina@yandex.ru](mailto:anna-ryabina@yandex.ru)

Abstract. Using a combination of methods including low-temperature nitrogen adsorption, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and others, the particle size distribution and morphology of amorphous boron, vanadium pentoxide, and boron modified with 2 wt. % vanadium pentoxide were investigated. The adsorption isotherms were analyzed in terms of their correspondence to the Brunauer – Deming – Deming – Teller (BDDT) classification and to the corresponding type of porosity, which is important for determining the potential application areas of the powders. It is shown that the type of chemical bonding in the adsorbent, its structure, and the features of surface formation during modification influence the adsorption and structural characteristics of the synthesized sample and allow its textural parameters to be controlled.

Keywords: porosity, specific surface area, vanadium pentoxide, boron powder, modifier, chemical bonding type

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state research program No. 124020600007-8 (Block 2).

For citation: Ryabina A.V., Shevchenko V.G., Krasilnikov V.N. Adsorption and structural characteristics of boron surface-modified with vanadium pentoxide. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2026;20(1):71–77.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2026-1-71-77>

Введение

Химические свойства бора и соединений на его основе [1; 2] определяют широкие возможности и перспективы их использования. Элементарный бор, обладая высокой теплотворной способностью при сгорании в кислороде, является перспективным металлическим горючим для энергетических конденсированных систем (ЭКС) различного назначения [3]. Так, по значению электроотрицательности, согласно [1], бор находится почти в середине шкалы, поэтому он может быть как окислителем, так и восстановителем в соединениях со степенью окисления +3 (B_2O_3) и –3 соответственно, электроотрицательность его составляет 2,04.

Аморфный бор медленно окисляется на воздухе даже при комнатной температуре, воспламеняется при нагревании выше 800 °С, при этом пленка B_2O_3 , образующаяся при сгорании бора на крупных кристаллах, препятствует полному сгоранию даже при значительно более высоких температурах. Поэтому поиск модификатора, его оптимальной концентрации для покрытия частиц с целью улучшения и максимального использования энергетических характеристик чистого бора является актуальной задачей [4; 5]. Наличие незаполненных внутренних электронных уровней у ванадия определяет и особенности физико-химических свойств его соединений. Главным из них является химическая связь между атомами ванадия и бора. Ванадий способствует образованию жестких ковалентных связей у частиц бора направленного характера, что приводит к слоистой структуре соединения [3; 6–9].

Активность модифицированного порошка зависит от методики синтеза, величины удельной поверхности, концентрации нанесенного металла, условий протекания процесса и др. Ранее при изучении окисления порошков в неизотермических условиях нагрева было определено оптимальное количество гидрогеля V_2O_5 (2 мас. %¹) для модифицирования алюминия путем его нанесения на поверхность [10; 11]. Такая концентрация модификатора и способ его совмещения с порошком не нарушают равномерного распределения металлического горючего в смесевых составах конденсированных систем

и не снижают содержание активного горючего в процессе получения энергетического материала.

Настоящая работа посвящена изучению адсорбционных характеристик исходного аморфного бора и модифицированного ксерогелем (2 % V_2O_5).

Экспериментальная часть

В эксперименте использовали порошок аморфного бора (ТУ 2112-024-49534204-20115) с фактическим содержанием общего В – 95,1 %, Mg – 0,9 %, Fe – 0,1 %, H_2O – 0,3 % и неучтенных примесей – 3,6 %, а также порошок бора, пропитанный гидрогелем V_2O_5 (2 % V_2O_5). Модифицирование осуществляли путем смешивания порошка бора с гидрогелем $V_2O_5 \cdot nH_2O$ и олеогелем $V(OCH_2)_2 \cdot n(НОСН_2)_2$, содержащими ванадий в количестве, необходимом для приготовления композиций состава 98 % В + 2 % V_2O_5 . Затем их подвергали сушке и прокаливанию при температурах 100–350 °С, достаточных для преобразования гелей в пентаоксид ванадия. Синтез и методики нанесения активатора на поверхность частиц описаны в работах [10; 12]. Размер частиц порошков измеряли на лазерном анализаторе LA950 (Horiba, Япония), морфологию изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM06390 LA (JEOL, Япония), оснащенном энергодисперсионным рентгеновским анализатором (EDX). Адсорбционные исследования проводили на объемной вакуумной статической автоматизированной установке Gemini VII 23907 (Micromeritics, USA) при температуре жидкого азота. Азот является наиболее широко распространенным газом, который используют для определения площади поверхности, так как он показывает промежуточные значения константы $C = 50 \div 250$ для большинства твердых поверхностей, предотвращая как локальную адсорбцию, так и поведение газа в области значений относительного давления $P/P_0 = 0,001–0,999$. Диапазон измерения этим методом удельной поверхности составляет от 0,2 до 300 м²/г. До и после эксперимента все образцы взвешивали на электронных весах высокой точности AUW 120D (Shimadzu, Япония).

Рентгенофазовый анализ (РФА) исследуемых образцов определяли на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 (CuK_α -излучение, $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) с использованием банка картотеки стандартов JCPDS. Диапазон углов сканирования составлял от 1 до 100°, скорость – 1 град/мин.

¹ Здесь и далее по тексту имеются в виду мас. %, если не указано иное.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1, *а* представлена микрофотография дегидратированного геля ванадия. Видно, что полости структуры в значительной мере «захлопнуты», форма частиц – игольчато-пластинчатая. Водная дисперсионная среда в гидрогеле пентаоксида ванадия выпаривается при нагревании, и остается небольшое количество связанной воды.

У образца бора также наблюдается слоистая пластинчато-игольчатая форма кристаллов (рис. 1, *б*). Электронно-микроскопическое исследование показывает морфологические особенности исходного и модифицированного пентаоксидом ванадия порошка аморфного бора (рис. 1, *в*), приготовленного с использованием гидрогеля $V_2O_5 \cdot nH_2O$. На микрофотографии чистого бора (см. рис. 1, *б*) видны конгломераты из частиц разных форм и размеров. Высокая степень агломерирования порошков вызвана стремлением к уменьшению их поверхностной энергии, при этом степень агломерации модифицированного пентаоксидом ванадия порошка гораздо выше. Вместе с тем наблюдаемые агрегаты состоят из частиц, размер которых не превышает 2 мкм. Частицы представляют собой ядро аморфного бора, покрытое оксидом бора и борной кислотой.

На рис. 1, *в* видны «микровыступы» чашуйчатого типа, сформированные нанесенным гидрогелем пентаоксида ванадия. Он образует на поверхности частиц наноструктурированный слой оксида, пропитанного $V_2O_5 \cdot nH_2O$, что также подтверждается результатами химического анализа в разных точках образца.

Частичная окисленность поверхности частичек, даже наиболее чистых образцов аморфного бора, обуславливает значительную гидрофильность его порошков. Соединения бора с ванадием сравнительно легко окисляются на воздухе, при длительном контакте с ним порошок конгломерируется в куски вследствие медленного окисления при комнатной температуре [1]. Как было показано в работах [13–16], пентаоксид ванадия является кислотным оксидом. Слои V_2O_5 имеют квазиоднородную слоистую структуру, образованы спутанными волокнами и соединены молекулами воды. Электронно-графическими исследованиями установлено, что волокна в структуре V_2O_5 -геля можно представить в виде плоских лент длиной 1000 Å и шириной 100 Å. Гели оксида ванадия относятся к проводникам со смешанным типом проводимости [17], которая складывается из электронной и ионной составляющих чистого и модифицированного бора с возможностью интеркалирования.

Анализ распределения частиц по размерам с обработкой порошков ультразвуком (лазерный ана-

лизатор Horiba LA950) показал, что в обоих случаях распределение – полимодальное и достаточно узкое с некоторым уширением в сторону больших размеров. Образец исходного бора имеет средний размер частиц 1,52 мкм, при покрытии гидрогелем он увеличивается до 3,98 мкм.

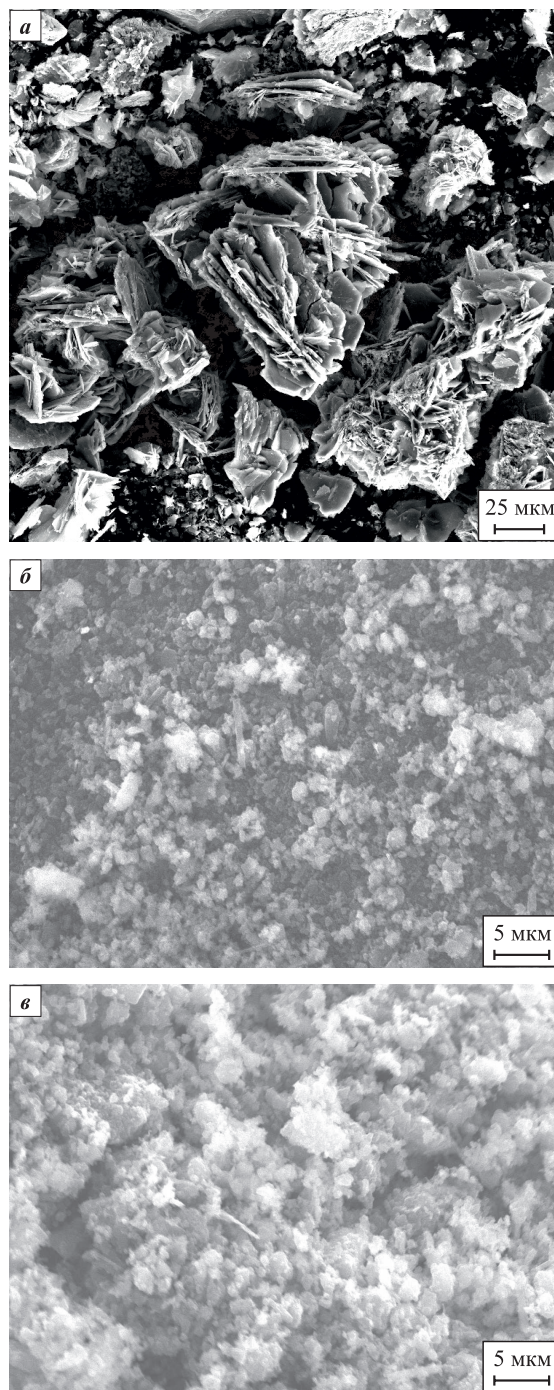


Рис. 1. Морфология частиц дегидратированного геля ванадия $V_2O_5 \cdot nH_2O$, высушенных при $t = 300^\circ C$ (*а*), бора исходного (*б*) и модифицированного $V_2O_5 \cdot nH_2O$ (*в*)

Fig. 1. Particle morphology of dehydrated vanadium pentoxide gel $V_2O_5 \cdot nH_2O$ dried at $t = 300^\circ C$ (*a*), initial boron powder (*b*), and boron modified with $V_2O_5 \cdot nH_2O$ (*v*)

Фазовый состав исходного и модифицированного образцов бора представлен на рис. 2.

Уширение рентгеновских линий характерно для материалов со слоистой структурой, где связь между плоскостями слабее, чем по другим направлениям в кристалле. Также аморфному характеру способствует остаточная связанная вода в образце. Наиболее сложно однозначно идентифицировать вещество, если оно присутствует в малом количестве (большинство его немногочисленных линий может совпадать с линиями основных фаз смеси) [18]. Следует отметить, что на дифрактограммах порошка бора, модифицированного гелем пентаоксида ванадия, отсутствуют специфические пики, отвечающие гидрогелю (см. рис. 2, б), что обусловлено малым относительным количеством (~2 %) добавки.

Атомы бора образуют прочную ковалентную связь, которая обеспечивает направленность и слоистость структуры. Кристаллическая структура В–V – это последовательное чередование слоев ванадия и бора. Известно, что определяющую роль в формировании свойств диборидов металлов IV группы играют связи металл–бор. При образовании боридов переходных металлов IV группы, атомы которых преимущественно являются донорами электронов, происходит переход нелокализованной части валентных электронов от атомов металла к атомам бора, что

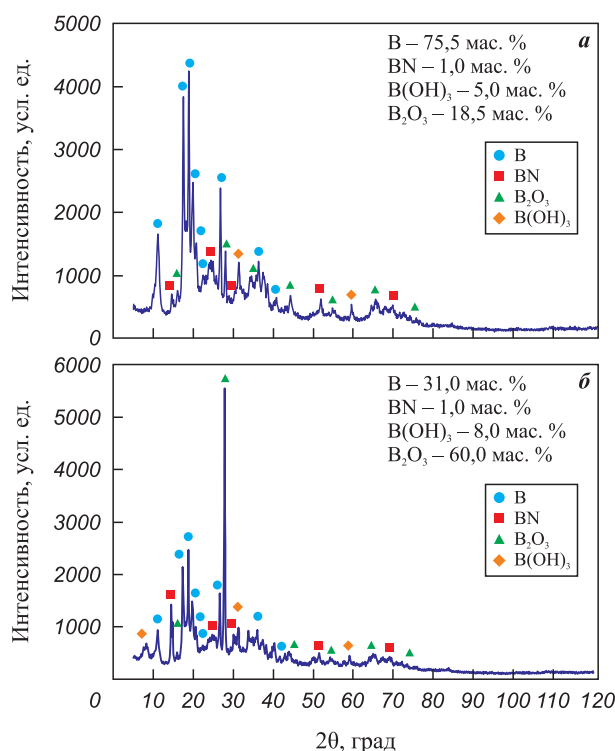


Рис. 2. Дифрактограммы исходного (а) и модифицированного V₂O₅·nH₂O (б) образцов бора

Fig. 2. XRD patterns of initial boron sample (a) and boron sample modified with V₂O₅·nH₂O (б)

стабилизирует его *sp*²-конфигурацию и способствует образованию жестких ковалентных связей атомов. Связи металлического характера характерны преимущественно между атомами металла и в меньшей степени – металла и бора [1].

На рис. 3 представлены изотермы адсорбции исследуемых образцов. Тип химической связи

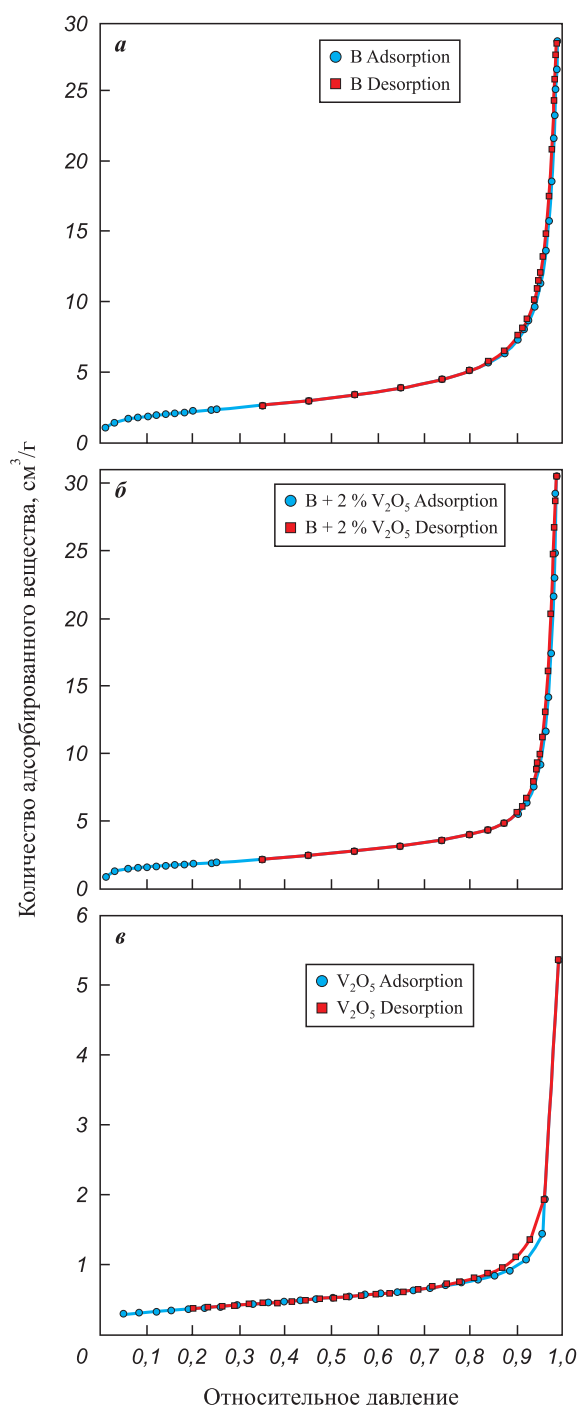


Рис. 3. Изотермы адсорбции исследуемых образцов
а – бор, б – В + 2 % V₂O₅, в – V₂O₅·nH₂O

Fig. 3. Adsorption isotherms of studied samples
а – boron, б – boron + 2 wt. % V₂O₅, в – V₂O₅·nH₂O

в адсорбентах играет важнейшую роль в процессах взаимодействия азота и адсорбента: чем сильнее она у них различается, тем большее отличие в ходе изотермы мы наблюдаем. По мере увеличения доли металлической связи в адсорбенте изотермы становятся все более вогнутыми, что свидетельствует об усилении влияния латеральных взаимодействий (рис. 3, в).

Изотермы адсорбции принадлежат ко 2-му типу по классификации БДТ с элементами 3-го и 4-го типов изотерм в связи с имеющимся слабым гистерезисом. Согласно рекомендациям Международного союза по теоретической и прикладной химии (IUPAC) [19; 20] этот тип изотерм представляет свободную монополи-слойную адсорбцию. Изотермы аморфного и модифицированного образцов бора имеют слабовыпуклый характер при малых относительных давлениях в мономолекулярной области, что говорит о преобладании взаимодействия адсорбат–адсорбент. Для V_2O_5 характерны пологий характер кривой в мономолекулярной области и взаимодействие адсорбат–адсорбат. Поры в реальных адсорбентах не могут быть какого-нибудь одного размера и одинаковой формы, и заполняются или опустошаются они не одновременно.

На фотографии с микроскопа (см. рис. 1) хорошо видны поры в слоистой структуре образцов, однако на изотермах мы можем наблюдать лишь слабый гистерезис. Вероятно, это связано с щелевидным характером преобладающих пор. Согласно классификации авторов [21] образцы имеют петли гистерезиса одного типа, который соответствует щелевидному типу пористой структуры. Поскольку в таких порах отсутствует кривизна поверхности, то капиллярная конденсация может происходить только в месте насыщения, когда $P/P_0 = 1$, т.е. по мере роста давления. При использовании модели щелевидных пор рассматривается простейший случай, когда пора представляет собой щель между двумя плоскими параллельными пластинами. При этом поверхность пленки, образованной при полимолекулярной адсорбции, является плоской, т.е. кривизна поверхности отсутствует и капиллярная конденсация при $P/P_0 < 1$ происходить не будет. Адсорбционная пленка утолщается и, когда слои сомкнутся, у краев пор образуется мениск цилиндрической формы. Десорбция начнется при давлении, соответствующем радиусу его кривизны, и будет продолжаться до полного опустошения [21–25]. Интерпретируя изотермы адсорбции азота при $T = 78$ К, можно с приемлемой точностью оценить удельную поверхность. У образца аморфного бора, по нашим расчетам, она составила $7,8 \text{ м}^2/\text{г}$, у V_2O_5 – $2,6 \text{ м}^2/\text{г}$ и для состава $B + 2\% V_2O_5$ – $6,53 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для образца высушенного ксерогеля ванадия характерно полимодальное распределение пор с уширением в сторону больших размеров (рис. 4, а), а для образцов аморфного и модифицированного бора –

бимодальное. Изотерма десорбции ближе к истинному термодинамическому равновесию, поэтому для оценки распределения пор по размерам ее данные более достоверные. Расчеты проводились с помощью уравнения Кельвина [22–26]. Так, по нашим данным для образца высушенного ксерогеля ванадия пористость составила $0,016546 \text{ см}^3/\text{г}$, исходного бора – $0,043070 \text{ см}^3/\text{г}$ и модифицированного $B + V_2O_5$ – $0,048450 \text{ см}^3/\text{г}$, а средние размеры пор у них – 28, 44 и 41 нм соответственно. Поскольку образцы состоят из крупных частиц с рыхлой упаковкой, их поры также укрупнены.

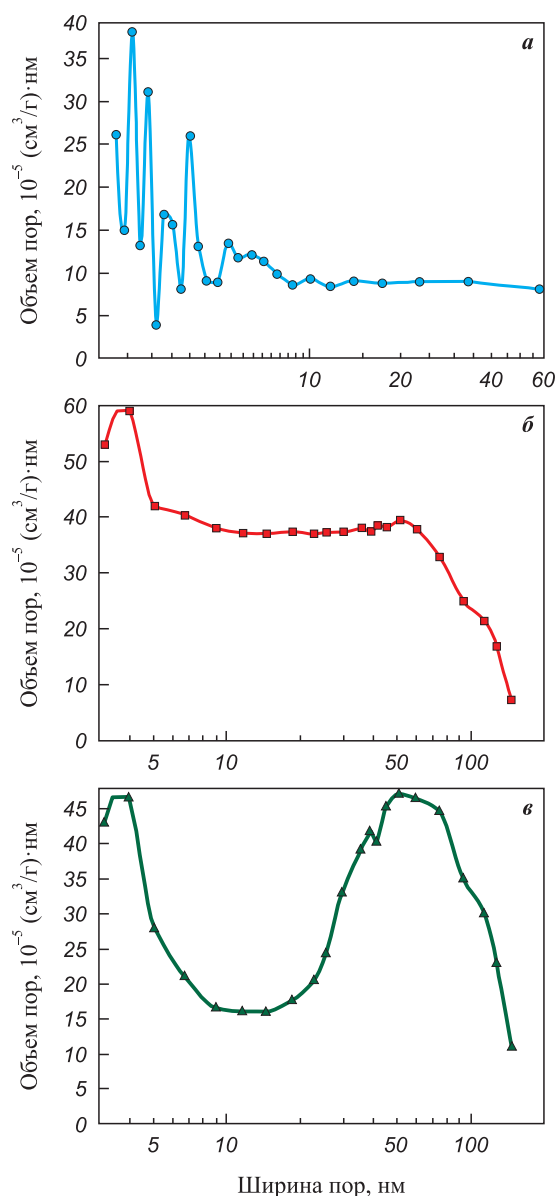


Рис. 4. Дифференциальные кривые распределения объема пор $V_2O_5 \cdot nH_2O$ (а), исходного (б) и модифицированного (в) образцов бора по их эффективным диаметрам

Fig. 4. Differential pore volume distributions versus effective pore diameter for $V_2O_5 \cdot nH_2O$ (a), initial boron (б), and boron modified with $V_2O_5 \cdot nH_2O$ (в)

Заключение

В ходе настоящего исследования выявлено, что природа химической связи и структура адсорбента определяют вид изотерм адсорбции и их принадлежность к определенному типу. Рассмотренные в работе изотермы по классификации БДТ относятся ко 2-му типу с элементами 3-го и 4-го типов изотерм. По мере увеличения доли металлической связи в адсорбенте изотермы становятся все более вогнутыми, что свидетельствует об усилении влияния латеральных взаимодействий. При этом высушивание гидрогеля приводит к схлопыванию его слоев и, как следствие, уменьшению пористости и сужению пор.

Гидрофильный характер поверхности аморфного бора способствует увеличению оксидного слоя при взаимодействии с гидрогелем ванадия во время нагрева и высушивания на воздухе при $t = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сильные ковалентные связи способствуют образованию слоистой направленной структуры бора, что приводит к преобладанию щелевидных пор, а крупные поры, являясь транспортными каналами по переносу вещества, влияют на скорость протекания адсорбции.

Список литературы / References

- Pauling L., The nature of the chemical bond. (3 ed.). N.Y.: Ithaca, 1960. 242 p.
- Самсонов Г.В., Марковский Л.Я., Жигач А.Ф., Валяшко М.Г. Бор его соединения и сплавы. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 590 с.
- Аликин В.Н., Вахрушев А.В., Голубчиков В.Б., Ермилов А.С., Липанов А.М., Серебренников С.Ю. Твердые топлива ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 2011. 380 с.
- King M.K. Boron ignition and combustion in air-augmented rocket after burners. *Seventh IANNAF Combustion Meeting*. 1972;204: 243–259.
<https://doi.org/10.1080/00102207208952516>
- Dreizin E.L., Keil D.G., Felder W., Vicenzi E.P. Phase changes in boron ignition and combustion. *Combustion and Flame*. 1999;119:272–290.
[https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(99\)00066-8](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(99)00066-8)
- Livage J. Vanadium pentoxide gels. *Chemistry of Materials*. 1991;3(4):578–593.
<https://doi.org/10.1021/cm00016a006>
- Vernardou D. State-of-the-art of chemically grown vanadium pentoxide nanostructures with enhanced electrochemical properties. *Advanced Materials Letters*. 2013; 4(11):798–810.
<https://doi.org/10.5185/amlett.2013.5485>
- Chernova N.A., Roppolo M., Dillon A.C., Whittingham M.S. Layered vanadium and molybdenum oxides: batteries and electrochromics. *Journal of Materials Chemistry*. 2009;19:2526–2552.
<https://doi.org/10.1039/B819629J>
- Захарова Г.С. Интеркалаты оксидов ванадия и нанотрубы на их основе: Синтез, строение, свойства: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Екатеринбург: Ин-т высокотемпературной электрохимии УрО РАН, 2007.
- Шевченко В.Г., Еселевич Д.А., Конюкова А.В., Красильников В.Н. Способ активации порошка алюминия: Патент 2509790. (РФ). 2014.
- Шевченко В.Г., Красильников В.Н., Еселевич Д.А., Конюкова А.В., Анчаров А.И., Толочко Б.П. Влияние V_2O_5 на механизм окисления порошка АСД-4. *Физика горения и взрыва*. 2015;51(5):70–76.
<https://doi.org/10.15372/FGV20150508>
Shevchenko V.G., Krasilnikov V.N., Yeselevich D.A., Konyukhova A.V., Ancharov A.I., Tolochko B.P. The effect of V_2O_5 on the mechanism of oxidation of ASD-4 powder. *Fizika gorennya i vzryva*. 2015; 51(5):70–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FGV20150508>
- Шевченко В.Г., Красильников В.Н., Еселевич Д.А., Конюкова А.В. Горючее как компонент энергетических конденсированных систем и способ его получения. Патент 2784154. (РФ). 2012.
- Aldebert P., Baffier N., Gharbi N., Livage J. Layered structure of vanadium pentoxide gels. *Materials Research Bulletin*. 1981;16(6):669–676.
[https://doi.org/10.1016/0025-5408\(81\)90266-X](https://doi.org/10.1016/0025-5408(81)90266-X)
- Aldebert P., Haesslin H.W., Baffier N., Livage J. Vanadium pentoxide gels. III. X-ray and neutron diffraction study of highly concentrated systems one-dimensional swelling. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1984;98(2): 478–483. [https://doi.org/10.1016/s0021-9797\(84\)80066-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9797(84)80066-1)
- Legendre J.-J. Vanadium pentoxide gels. I. Structural study by electron diffraction. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1983;94(1):75–83.
[https://doi.org/10.1016/0021-9797\(83\)90236-9](https://doi.org/10.1016/0021-9797(83)90236-9)
- Legendre J.-J., Aldebert P., Baffier N., Livage J. Vanadium pentoxide gels. II. Structural study by X-ray diffraction. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1983;94(1): 84–89. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(83\)90237-0](https://doi.org/10.1016/0021-9797(83)90237-0)
- Barboux P., Baffier N., Morineau R., Livage J. Diffusion protonique dans les xerogels de pentoxyde de vanadium. *Solid State Ionics*. 1983;9-10(2):1073–1080.
[https://doi.org/10.1016/0167-2738\(83\)90133-9](https://doi.org/10.1016/0167-2738(83)90133-9)
- Ковба Л.М. Рентгенография в неорганической химии. М.: МГУ, 1991. 255 с.
- Грег С., Синг К. Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость. М.: Мир, 1984. 306 с.
- Rouquerol F., Rouquerol J., Sing I.K.S.W. Adsorption by powders and porous solids. Principles, methodology and applications. San Diego; London; Boston; New York; Sydney; Tokyo; Toronto: Academic Press, 1999. 467 p.
- Lippens B.C., de Boer J.H. Studies on pore systems in catalysts. *Journal of Catalysis*. 1965;4:319–323.
[https://doi.org/10.1016/0021-9517\(65\)90307-6](https://doi.org/10.1016/0021-9517(65)90307-6)
- Barret E.P., Joyner L.G., Halenda P.P. The determination of pore volume and area Distribution in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *Journal of the American Chemical Society*. 1951;73:373–380.
<https://doi.org/10.1021/ja01145a126>
- Harkins W. D., Jura G. Surfaces of solids. XII. An absolute method for the determination of the area of a finely divided crystalline solid. *Journal of the American Chemical*

Society. 1944;66(8):1362–1366.

<https://doi.org/10.1021/ja01236a047>

24. Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 413 с.

25. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука, 1999. 470 с.

26. Butt H.-J., Graf K., Kappl M. Physics and Chemistry of Interfaces. John Wiley & Sons, 2006. 373 p.
<https://doi.org/10.1002/ange.200385136>

Сведения об авторах



Анна Владимировна Рябина – к.х.н., ст. науч. сотрудник лаборатории физико-химии дисперсных систем, Институт химии твердого тела (ИХТТ УрО РАН)

ORCID: 0009-0004-6375-7067

E-mail: anna-ryabina@yandex.ru

Владимир Григорьевич Шевченко – д.х.н., гл. науч. сотрудник, зав. лабораторией физико-химии дисперсных систем, ИХТТ УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6682-9685

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Владимир Николаевич Красильников – д.х.н., гл. науч. сотрудник лаборатории неорганического синтеза, ИХТТ УрО РАН

ORCID: 0000-0001-6381-0746

E-mail: kras@ihim.uran.ru

Information about the Authors

Anna V. Ryabina – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Laboratory of Physical Chemistry of Disperse Systems, Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC UB RAS)

ORCID: 0009-0004-6375-7067

E-mail: anna-ryabina@yandex.ru

Vladimir G. Shevchenko – Dr. Sci. (Chem.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Physical Chemistry of Disperse Systems, ISSC UB RAS

ORCID: 0000-0002-6682-9685

E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru

Vladimir N Krasilnikov – Dr. Sci. (Chem.), Chief Researcher, Laboratory of Inorganic Synthesis, ISSC UB RAS

ORCID: 0000-0001-6381-0746

E-mail: kras@ihim.uran.ru

Вклад авторов



А. В. Рябина – определение цели работы, проведение экспериментов, написание и оформление статьи.

В. Г. Шевченко – участие в обсуждении результатов.

В. Н. Красильников – подготовка исходных образцов.

Contribution of the Authors

A. V. Ryabina – defined the research objective, conducted experiments, and wrote the manuscript.

V. G. Shevchenko – participated in the discussion of the results.

V. N. Krasilnikov – prepared the initial samples.

Статья поступила 03.05.2025 г.
Доработана 29.10.2025 г.
Принята к публикации 05.10.2025 г.

Received 03.05.2025
Revised 29.10.2025
Accepted 05.10.2025