

[et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2019. – Vol. 19, № 17. – P. 7644–7651.

2. A Laser Written 4D Optical Microcavity for Advanced Biochemical Sensing in Aqueous Environment / A. V. Saetchnikov [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Vol. 38, № 8. – P. 2530–2538.

3. Multiresonator Imaging Sensor for the Aerial Parameters Detection / A. V. Saetchnikov [et al.] // IEEE Journal on Minia-turization for Air and Space Systems. – 2021. – Vol. 2, № 2. – P. 84–91.

4. Deep-learning powered whispering gallery mode sensor based on multiplexed imaging at fixed frequency /

A. V. Saetchnikov [et al.] // Opto-Electronic Advances. – 2020. – Vol. 3. – P. 200048.

5. Self-learning-based detection via multiple microresonator imaging / A. V. Saetchnikov [et al.] // Proc. SPIE. – 2021. – Vol 11782. – P. 117822E.

6. Intelligent optical microresonator imaging sensor for early stage classification of dynamical variations / A. V. Saetchnikov [et al.] // Advanced Photonics Research. – 2021. – P. 2100242.

7. Machine-learning based analysis of time sequences for multiplexed microresonator sensor / A. V. Saetchnikov [et al.] // Proc. SPIE. – 2022. – Vol 12139. – P. 121390E.

УДК 666.7

**ТЕРМОСТОЙКИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА**
Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Самсонова А.С.¹, Пантелеенко Ф.И.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Показана возможность получения синтетического волластонита из отечественных сырьевых материалов. Представлены результаты исследований термостойких керамических изделий; установлены закономерности изменения физико-технических, теплофизических характеристик и рентгеноструктурных показателей керамики на основе различного природного сырья, а также отходов химических производств. Результаты исследований могут использоваться для производства теплоизоляционной керамики, электроизоляторов, детали для литейных установок на основе синтетического волластонита.

Ключевые слова: синтетический волластонит, техническая керамика, температурный коэффициент линейного расширения, термостойкость, синтез.

**HEAT-RESISTANT CERAMIC MATERIALS
BASED ON SYNTHETIC WOLLASTONITE**
Popov R.¹, Dyatlova E.¹, Samsonova A.¹, Panteleenko F.²

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The possibility of obtaining synthetic wollastonite from domestic raw materials is shown. The results of studies of heat-resistant ceramic products are presented; the regularities of changes in physical-technical, thermophysical characteristics and X-ray diffraction parameters of ceramics based on various natural raw materials, as well as chemical production wastes, have been established. The research results can be used for the production of heat-insulating ceramics, electrical insulators, parts for foundry installations based on synthetic wollastonite.

Key words: synthetic wollastonite, technical ceramics, temperature coefficient of linear expansion, heat resistance, synthesis.

Адрес для переписки: Самсонова А.С., ул. Белорусская, 21, Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: misakamadara@yandex.by

В настоящее время одним из востребованных направлений современной науки является получение синтетического волластонита. Важными технологическими свойствами волластонита являются высокая химическая стойкость в различных средах, небольшая удельная масса, уникальные диэлектрические свойства, игольчатый габитус частиц, а также низкие значения коэффициента термического расширения и теплопроводности [1].

Различные исследования подтвердили принципиальную возможность использования природного и синтетического волластонита в качестве

сырья для получения теплоизоляционной керамики, электро- и теплоизоляторов с чрезвычайно низкими диэлектрическими потерями, специальной радиокерамики, для производства заготовок и слитков в горизонтальных и вертикальных литейных установках, т.е. форсунки, носики, поплавки, стопоры и кольца с горячим верхом [2, 3].

Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики при минимальном содержании спекающей добавки, не снижая термостойкости, а в некоторых случаях

вообще отказаться от применения спекающих добавок [4].

Целью данной работы является изучение возможности применения отечественных сырьевых компонентов для получения волластонитсодержащей керамики.

Разработка керамических материалов на основе синтетического волластонита осуществлялась в двух направлениях при разном соотношении оксидов $\text{CaO}:\text{SiO}_2$. В первом случае использовалось отечественное сырье: карбонатсодержащее (доломитовая мука), в качестве кремнеземсодержащее (трепел, маршалит). Пластификатором выступала огнеупорная глина Веселовского месторождения. Количество компонентов изменялось в пределах: доломитовая мука (32–67 мас. %), трепел (30–53 мас. %), глина (10–15 мас. %), маршалит (18–28 мас. %).

Во втором случае применялось следующее сырье: карбонатсодержащее (отходы в виде циклонной пыли филиала № 4 «Производство извести и мела» ОАО «Белорусский цементный завод» (г. Климовичи)), кремнеземсодержащее (трепел, маршалит (молотый кварцевый песок)). Пластифицирующим компонентом являлась глина Веселовского месторождения.

Изготовление опытных образцов в виде цилиндров диаметром 12 мм осуществлялся методом полусухого прессования при давлении 20–25 МПа. Обжиг материалов проводился в интервале температур 1000–1250 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Результаты измерения физико-химических свойств экспериментальных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства опытных образцов

Номер состава	Свойства образцов при температуре обжига, °С					
	1000	1050	1100	1150	1200	1250
	Водопоглощение, %					
1	34,3	31,4	31,2	28,4	21,5	–
2	–	47,3	45,2	44,2	39,1	23,2
3	21,5	21,3	17,8	11,7	–	–
4	–	35,3	33,3	32,3	31,7	16,4
	Кажущаяся плотность, кг/м ³					
1	1445	1489	1522	1553	1760	–
2	–	1265	1271	1287	1366	1775
3	1695	1712	1788	1970	–	–
4	–	1394	1431	1454	1476	1867
	Открытая пористость, %					
1	49,6	46,7	47,4	44,1	37,9	–
2	–	59,8	57,4	56,9	53,4	41,2
3	36,5	36,4	31,9	23,0	–	–
4	–	49,2	47,7	46,9	46,8	30,6

Визуальные наблюдения за изменениями обожженных образцов в процессе их хранения на воздухе показали, что одни образцы хранились длительное время без изменения целостности, другие уже через несколько недель начинали самопроизвольно разрушаться. Это связано с незавершенно-

стью процесса синтеза волластонита (присутствием в обожженных изделиях нестабильных промежуточных соединений, а также не прореагировавшего оксида кальция, гидратация которого на воздухе является основной причиной разрушения изделий в процессе хранения) [5].

В ходе исследования были установлены зависимости свойств керамики от состава и температуры синтеза.

Исследования свойств позволили сделать выводы о том, что более полное спекание наблюдается в образцах на основе отходов в виде циклонной пыли и трепела при оптимальной температуре обжига 1150 °С и обладают лучшими эксплуатационными характеристиками (водопоглощение – 11,5 %, кажущаяся плотность – 1970 кг/м³, открытая пористость – 23,0 %, механическая прочность – 70,6 МПа, температурный коэффициент линейного расширения – $4,11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, термостойкость (вода – 800 °С) составляла не менее 50 теплосмен без проявления усадки и разрушения).

Механическая прочность при сжатии материалов, полученных на основе масс, содержащих трепел и обожженных при температуре 1150 °С, которая является оптимальной, находится в пределах 20,1–70,6 МПа. Согласно источникам литературы волластонит имеет вытянутую по длине структуру кристаллов. При раскальвании этих кристаллов образуются зерна игольчатой формы, которые играют роль микроармирования, что повышает механическую прочность керамики.

В интервале температур 1000–1250 °С в образцах на основе отходов в виде циклонной пыли и трепела наблюдается некоторое уменьшение значений температурного коэффициента линейного расширения, что может быть обусловлено увеличением формированием необходимых кристаллических фаз при спекании, растворением в ней кварца, т. е. обогащение стеклофазы кремнеземом, обладающими следующими значениями ТКЛР ($\alpha = (4,11–6,42) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), а также формированием структуры материала, обеспечивающего релаксацию термомеханических напряжений с увеличением температуры.

Присутствие кремнеземсодержащего материала, а именно трепела, в составе масс способствует активации процессов фазообразования и спекания керамических материалов, а также способствует снижению температуры синтеза, за счет наличия аморфной составляющей, гидратных оболочек, или примесных составляющих в исходных сырьевых материалах.

Исследование фазового состава оптимального состава методом рентгенофазового анализа позволяет сделать выводы о том, что волластонит и кварц представлены основными кристаллическими фазами, в незначительном количестве зафиксированы алюмосиликаты кальция.

В результате проведенных исследований установлена возможность получения теплоизоляционных керамических материалов на основе синтетического волластонита.

Литература

1. Салтевская, Л. М. Синтез волластонита и его применение в керамических массах / Л. М. Салтевская [и др.] // Стекло и керамика. – 1974. – № 2. – С. 22–24.
2. Демиденко, Н. И. Спекание керамических масс на основе природного волластонита / Н. И. Демиденко, Е. С. Конкина // Стекло и керамика. – 2003. – № 1. – С. 15–16.

3. Тихомирова, И. Н. Теплоизоляционные материалы на основе кремнеземсодержащего сырья / И. Н. Тихомирова, Т. В. Скорина // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 58–60.

4. Кулдашева, А. Х. Экспериментальные исследования прочностных свойств бетонов на основе волластонитового сырья / А. Х. Кулдашева // Вестник. – 2011. – № 7. – С. 627–630.

5. Карионова, Н. П. Пористые волластонитсодержащие керамические материалы на основе композиций высококремнеземистого сырья с природными и технологическими компонентами: дис. ... канд. тех. наук : 05.17.11 / Н. П. Карионова. Томский политехнический университет. – Томск, 2013. – 171 с.

УДК 546.26.539

ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ЭПР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К УФ И ЛАЗЕРНОМУ ИЗЛУЧЕНИЯМ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВ НАНОАЛМАЗА

Олешкевич А.Н.¹, Сернов С.П.², Долматов В.Ю.³, Лапчук Т.М.¹, Лапчук Н.М.¹

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³ФГУП «СКТБ «Технолог»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследована чувствительность основных параметров спектров ЭПР к ультрафиолетовому и лазерному излучениям при облучении образцов спеченных при высоких давлениях и температурах порошков детонационного наноалмаза. Сравнительная характеристика результатов показала возможность использования исследуемого сверхтвердого композиционного материала на основе спеченных порошков ДНА для изготовления датчиков ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 200–290 нм и лазерного ИК излучения.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс, детонационные наноалмазы, спеченные порошки наноалмаза, ультрафиолетовое излучение, лазерное излучение.

DIAGNOSTICS BY THE EPR METHOD OF SINTERED NANODIAMOND POWDERS SENSITIVE TO UV AND LASER RADIATIONS

Oleshkevich A.¹, Sernov S.², Dolmatov V.³, Lapchuk T.¹, Lapchuk N.¹

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³FGUP "SKTB" Technologist "

St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The sensitivity of the main parameters of the EPR spectra to ultraviolet and laser radiation under irradiation of samples of detonation nanodiamond powders sintered at high pressures and temperatures has been investigated. Comparative characteristics of the results showed the possibility of using the investigated composite material based on DND powders for the manufacture of ultraviolet radiation sensors in the wavelength range of 200–290 nm and IR laser radiation.

Key words: electron paramagnetic resonance, detonation nanodiamonds, sintered nanodiamond powders, ultraviolet radiation, laser radiation.

Адрес для переписки: Сернов С.П., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ssernov@bntu.by

Детонационные наноалмазы (ДНА) имеют сложную природу, их характеристики и свойства определяются методом получения, способами химической очистки и модификации поверхности. Спекание порошков ДНА осуществляется с целью синтеза новых композиционных материалов для применения в приборостроении, спинтронике и электронике.

Цель работы – установить особенности влияния на парамагнитные свойства спеченных порошков детонационного наноалмаза таких внешних факторов, как ультрафиолетовое и лазерное излучение.

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) исследованы спеченные таблетки на основе порошков ДНА. Спекание образцов