

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.2.03  
УДК 546.05

Научная статья

**Л.С. Козлов<sup>1</sup>, К.О. Ухин<sup>2</sup>, М.А. Савастьянова<sup>2</sup>,  
В.А. Вальцифер<sup>2</sup>, В.Н. Стрельников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФКП «Пермский пороховой завод», г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>Институт технической химии УрО РАН –  
филиал ФГБУН Пермского федерального  
исследовательского центра УрО РАН, г. Пермь, Россия

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НА ТЕКСТУРНО-СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИДА ЦИНКА, ВЫСАЖЕННОГО НА ПОВЕРХНОСТЬ ЧАСТИЦ УГЛЕРОДНОГО НОСИТЕЛЯ

*Оксид цинка является одним из ключевых компонентов резиновой и шинной промышленности. Ввиду экологических ограничений актуальной задачей является снижение содержания оксида цинка в составе резиновой смеси, одновременно с сохранением его функции и эффективности действия как активатора процесса вулканизации. Одним из возможных способов решения данной проблемы является использование нанодисперсных частиц оксида цинка, высаженных на поверхность дисперсного носителя. Данный подход позволит уменьшить дозу металлооксидного активатора вулканизации в составе смеси, повысив при этом эффективность его действия за счет более высокой удельной поверхности, а также решить проблему агломерации нанодисперсных металлооксидных частиц. Подходящим для данных целей дисперсным носителем является углеродная сажа (технический углерод).*

*В настоящей статье представлены данные о методах поверхностной модификации частиц углеродного носителя оксидом цинка. Приведены результаты исследования влияния прекурсоров оксидной фазы на фазовый состав и текстурные параметры синтезируемых образцов.*

*Показано, что образец, полученный методом пропитки с использованием в качестве прекурсора оксидной составляющей нитрата цинка, позволяет сформировать на поверхности частиц углеродного носителя оксид цинка в фазе цинкита со средним размером кристаллитов около 15 нм. Фазовый состав образцов, полученных методом химического осаждения с использованием в качестве прекурсора оксидной составляющей хлорида цинка, вне зависимости от вида щелочного осадителя и температуры прокаливания, является более многообразным и представлен сложными комплексными соединениями. Установлено, что повышение темпе-*

ратуры прокаливания приводит к значительному росту удельной поверхности синтезируемых образцов.

**Ключевые слова:** оксид цинка, технический углерод, текстурные характеристики, фазовый состав, пропитка, химическое осаждение.

**L.S. Kozlov<sup>1</sup>, K.O. Ukhin<sup>2</sup>, M.A. Savastyanova<sup>2</sup>,  
V.A. Valtsifer<sup>2</sup>, V.N. Strelnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>The Perm Gunpowder Factory FKP, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences as affiliated branch of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

## **INVESTIGATING THE INFLUENCE OF THE PREPARATION TECHNIQUE ON TEXTURAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF ZINC OXIDE DEPOSITED ONTO THE SURFACE OF CARBON CARRIER PARTICLES**

*Zinc oxide has been one of the key components in the rubber and tire industry. In view of environmental restrictions, reducing the content of zinc oxide in composition of a rubber compound, with simultaneously preserving its function and performance as an activator of the vulcanization process, is a task of current importance. Using nanodispersive zinc oxide particles deposited onto the surface of a dispersive carrier is one of possible ways of meeting this challenge. This approach would enable reducing the fraction of the metal oxide vulcanization activator in the mixture, with the efficiency of its action being increased at the expense of a higher specific surface area, and the agglomeration problem of nanodispersive metal oxide particles solved as well. Carbon black (technical carbon black) seems to be a suitable dispersive carrier for these purposes. This article provides the data on the techniques for surface modification of carbon carrier particles by zinc oxide. There are reported the results of a study of how oxide phase precursors affect the phase composition and textural parameters of synthesized samples.*

*A sample obtained by the impregnation technique using the oxide component of zinc nitrate as a precursor is evinced as being capable of forming zinc oxide in the zincite phase as crystallites averagely sized 15 nm on the surface of carbon carrier particles. The phase composition of the samples obtained by chemical deposition using the oxide component of zinc chloride as a precursor, regardless of the type of alkaline precipitant and calcination temperature, is more diverse and represented by complicated complex compounds. An increase in calcination temperature is ascertained to give rise to a significant increase in the specific surface area of the synthesized samples.*

**Keywords:** zinc oxide, carbon black, textural characteristics, phase composition, impregnation, chemical deposition.

В настоящее время оксид цинка (ZnO) находит широкое применение в химической и фармацевтической промышленности [1, 2], электронике [3, 4], гетерогенном катализе [5, 6] и т.д. При этом одним из основных применений оксида цинка является шинная промышленность, где

ZnO выполняет роль активатора вулканизации [7]. Считается, что на первой стадии реакции вулканизации ZnO взаимодействует с ускорителем вулканизации, образуя цинковые соли, которые способствуют ускорению реакции присоединения серы к макромолекулам каучука [8–10].

Основным недостатком ZnO является его гидрофильный характер вследствие наличия гидроксильных групп на поверхности [11], который контрастирует с гидрофобной природой каучуковых цепей. Это препятствует равномерному распределению частиц ZnO в матрице каучука, обуславливая необходимость введения большего количества ZnO для достижения гомогенной вулканизации. Более того, показано, что высвобождение ZnO в результате износа резиновых изделий вызывает неблагоприятные последствия для организма человека и окружающей среды [12]. Таким образом, задача снижения концентрации и улучшения распределения частиц ZnO в составах резиновых изделий является актуальной.

Одним из возможных способов решения данной проблемы является нанесение нанодисперсных каталитически активных частиц оксида цинка на поверхность дисперсного носителя. Данный подход позволит уменьшить дозу металлооксидного активатора вулканизации в составе смеси, повысив при этом эффективность его действия за счет более высокой удельной поверхности, а также решить проблему агломерации нанодисперсных металлооксидных частиц. Подходящим для данных целей дисперсным носителем является углеродная сажа (технический углерод).

Технический углерод является наиболее широко используемым армирующим наполнителем в резиновой промышленности [13, 14]. Введение технического углерода в состав вулканизатов способствует улучшению физико-механических и эксплуатационных свойств готового изделия. На долю технического углерода приходится примерно 30 % всей смеси.

В настоящей статье приводятся данные об использованных методах поверхностной модификации частиц углеродного носителя оксидом цинка. Сообщается о результатах исследования влияния прекурсоров оксидной фазы на фазовый состав и текстурные параметры синтезируемых образцов.

Для поверхностной модификации частиц углеродного носителя использовались два метода: пропитка и химическое осаждение.

Метод пропитки заключается в смешивании навески углеродного носителя с водным раствором солей соответствующих металлов с последующим выпариванием растворителя и прокаливанием полученной

углеродно-солевой композиции в заданных температурно-временных режимах. На первом этапе готовили раствор водорастворимой соли цинка, а именно нитрата цинка  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ . Хорошая растворимость нитрата цинка в воде позволила проводить процесс растворения при температуре +25 °С. Далее в полученный раствор при постоянном перемешивании вводилась навеска углеродного носителя, в качестве которого был использован технический углерод марки П-803. Полученную суспензию подвергали обработке с помощью ультразвукового гомогенизатора для лучшего диспергирования и пропитки частиц углеродного носителя раствором солей. Последующее удаление растворителя производилось путем выпаривания в ротационном испарителе Heidolph Hei-VAP Advantage при постоянном перемешивании и температуре 80–90 °С до постоянства массы. Полученный полупродукт прокаливали в инертной атмосфере. Температурно-временные режимы прокаливания, необходимые и достаточные для разложения солей металлов до соответствующих оксидов, определены методом ТГА. Методом пропитки был синтезирован образец «П-803-ZnO».

Вторым рассмотренным методом нанесения оксида цинка на поверхность частиц углеродного носителя (П-803), является метод химического осаждения гидролизированных форм металлов на поверхность частиц подложки с помощью водного раствора щелочи, в качестве которой были рассмотрены карбонат аммония  $(NH_4)_2CO_3$  и гидроксид натрия NaOH. В качестве прекурсора активной оксидной составляющей в данном методе был рассмотрен хлорид цинка  $ZnCl_2$ . Метод химического осаждения представлял интерес для изучения как альтернативный ранее описанному методу пропитки.

Суть метода химического осаждения заключается в следующем: к раствору хлорида цинка в дистиллированной воде добавляли расчетную навеску углеродного носителя. Полученную суспензию подвергали обработке с помощью ультразвукового гомогенизатора для лучшего диспергирования частиц носителя в суспензии. Последующее удаление растворителя производилось путем выпаривания в ротационном испарителе Heidolph Hei-VAP Advantage при постоянном перемешивании и температуре 80–90 °С до постоянства массы. К высушенной порошкообразной композиции добавляли раствор щелочного осадителя в дистиллированной воде при мольном соотношении с нитратами 2 : 1. Далее в роторном испарителе при постоянном перемешивании, температуре 130 °С и пониженном давлении производили постепенное

выпаривание растворителя до постоянства массы. Полученный порошок прокаливали в инертной атмосфере при 350 °С. Указанным методом были синтезированы два образца, различающиеся видом использованного щелочного осадителя, а именно «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>», где в качестве щелочного осадителя использовали карбонат аммония (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и «П-803-ZnO-NaOH», в котором в качестве щелочного осадителя использовали гидроксид натрия NaOH.

Стоит отметить, что расчетная массовая доля оксида цинка в составе синтезируемых образцов составляла 20 мас. % вне зависимости от метода получения и вида используемого щелочного осадителя.

Фазовый состав оксидной составляющей синтезируемых образцов был определен с помощью метода РФА на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) при использовании CuK $\alpha$ -излучения ( $\lambda_{\text{ср}} = 1,54184 \text{ \AA}$ ).

На рис. 1 приведена рентгенограмма фазового состава активной оксидной составляющей образца «П-803-ZnO», полученного методом пропитки с использованием в качестве прекурсора оксидной фазы нитрата цинка.

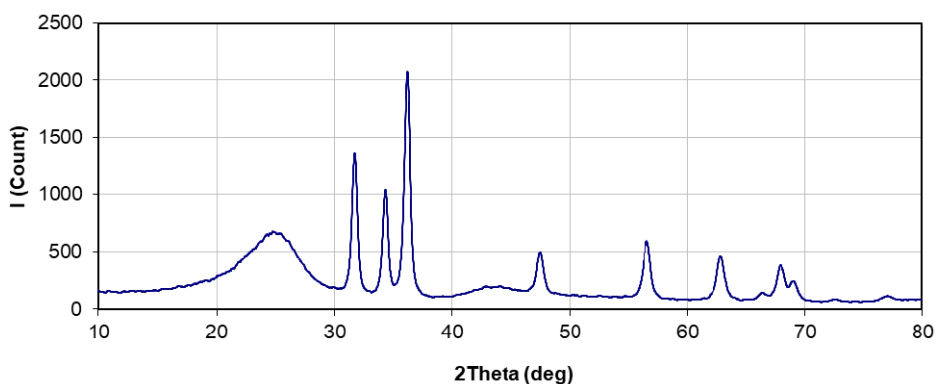


Рис. 1. РФА рентгенограмма фазового состава активной оксидной составляющей образца «П-803-ZnO»

Согласно данным РФА анализа, активная оксидная составляющая образца «П-803-ZnO» представлена оксидом цинка в фазе цинкита (JCPDS #00-036-1451). Средний размер частиц кристаллитов, составляющих оксидную фазу, был определен с помощью уравнения Шеррера [15] и равен 15 нм.

На рис. 2 приведена РФА рентгенограмма фазового состава оксидной составляющей образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>».

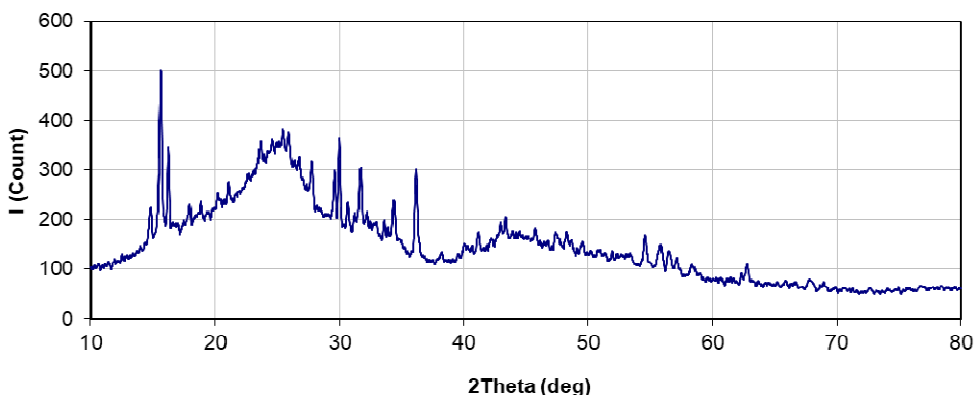


Рис. 2. РФА рентнограмма фазового состава активной оксидной составляющей образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>»

Из данных РФА анализа следует, что фазовый состав образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>» более многообразен. В составе образца обнаружена аммониевая соль тетрахлорцинка, представляющая собой неорганическое соединение с формулой (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>ZnCl<sub>4</sub> (JCPDS #00-002-0155), сложное соединение оксида цинка-хлорида цинка дигидрата ZnO·ZnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (JCPDS #00-045-0819), а также хлорид аммония NH<sub>4</sub>Cl (JCPDS #04-016-0227). Чистой фазы оксида цинка обнаружено не было.

Можно предположить, что данное многообразие активной каталитического компонента образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>», полученного с использованием хлорида цинка, обусловлено недостаточно высокой температуры прокаливания при синтезе. В этой связи дальнейшим шагом являлось получение образца, аналогичного «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>», однако прокаленного при более высокой температуре – 650 °С.

На рис. 3 приведена РФА рентнограмма фазового состава активной оксидной составляющей образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (650С)», полученного методом химического осаждения, с использованием в качестве щелочного осадителя карбонат аммония (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и прокаленного при температуре 650 °С.

Согласно данным РФА анализа, повышение температуры прокаливания до 650 °С не привело к появлению фазы оксида цинка в составе образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (650С)». Фазовый состав образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (650С)» представлен сложным комплексным соединением (NH<sub>4</sub>O)ClO<sub>4</sub>·2NH<sub>2</sub>OH (JCPDS #00-035-0837), а также сульфидом цинка ZnS (JCPDS #00-065-0724).

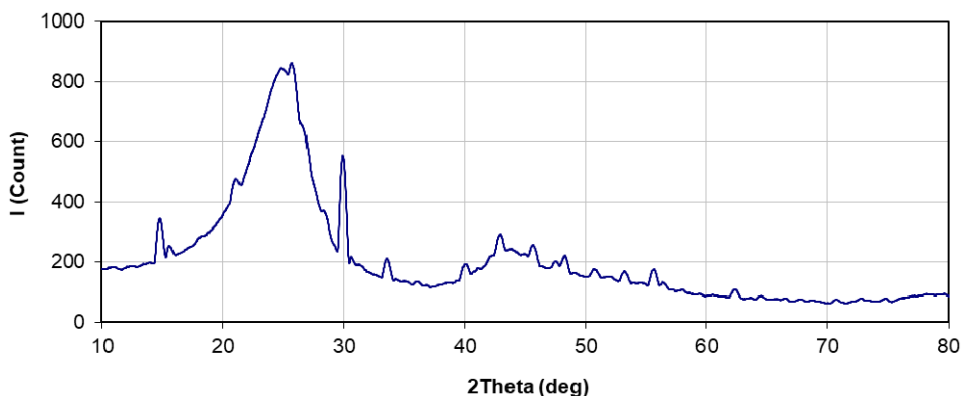


Рис. 3. РФА рентгенограмма фазового состава оксидной составляющей образца «П-803-ZnO-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (650C)»

На следующем этапе проведения исследований был изучен фазовый состав образцов полученных методом химического осаждения с использованием гидроксида натрия (NaOH), в качестве щелочного осадителя. Были исследованы две температуры прокаливания – 350 и 650 °С. На рис. 4 и 5 приведены РФА рентгенограммы, полученные для образцов, синтезированных с применением хлорида цинка в качестве прекурсора оксидной составляющей и гидроксида натрия в качестве осадителя, прокаленные при 350 и 650 °С – «П-803-ZnO-NaOH» и «П-803-ZnO-NaOH (650C)» соответственно.

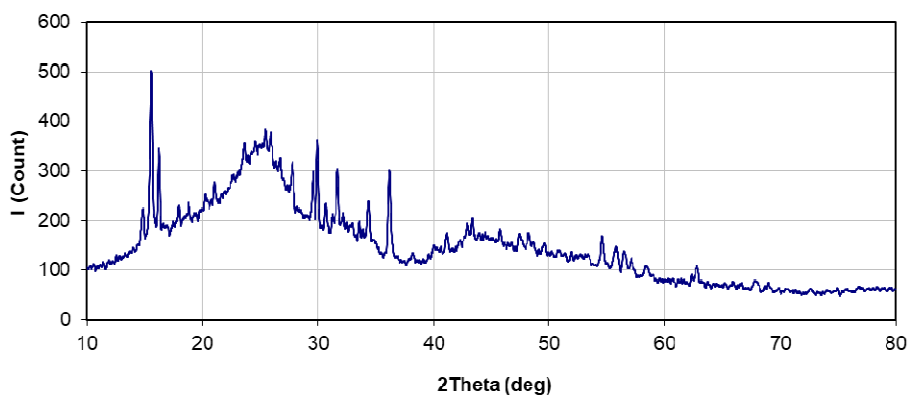


Рис. 4. РФА рентгенограмма фазового состава оксидной составляющей образца «П-803-ZnO-NaOH»

Проведенный РФА анализ образцов «П-803-ZnO-NaOH» и «П-803-ZnO-NaOH (650C)» показал, что замена осадителя, как и повышение температуры прокаливания, не приводит к снижению многообразия фазового

состава активной оксидной составляющей образцов. Помимо оксида цинка в указанных образцах вне зависимости от температуры прокаливания отмечено наличие в составе кристаллогидратов  $\text{Na}_2\text{ZnCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS #00-016-0176) и  $\text{Zn}_2\text{OCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS #00-045-0819).

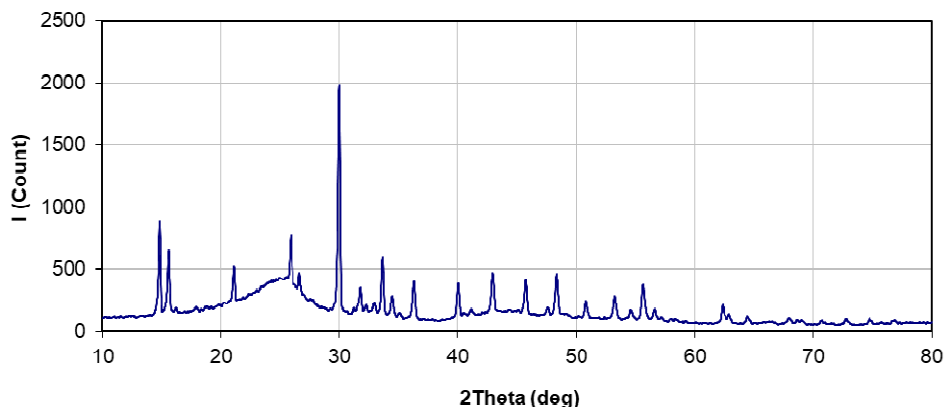


Рис. 5. РФА рентгенограмма фазового состава оксидной составляющей образца «П-803-ZnO-NaOH (650C)»

Методом низкотемпературной сорбции газообразного азота на приборе ASAP 2020 (Micromeritics) изучены текстурные параметры (удельная поверхность, общий объем и средний размер пор) синтезированных образцов. Удельная поверхность ( $S$ ) образцов рассчитана по методу BET.

В таблице приведены текстурные параметры полученных образцов поверхностно-модифицированного углеродного носителя, в сравнении с немодифицированной углеродной основой.

Текстурные параметры полученных образцов поверхностно модифицированного углеродного носителя, в сравнении с немодифицированной углеродной основой

Образец	Вид щелочного осадителя	Прекурсор оксидной фазы	$S$ , м <sup>2</sup> /г	$V_{\text{пор}}$ , см <sup>3</sup> /г	$D_{\text{пор}}$ , нм
Технический углерод П-803	–	–	19,6	0,06	12,3
П-803-ZnO	–	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	21,6	0,07	13,9
П-803-ZnO-( $\text{NH}_4$ ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ZnCl <sub>2</sub>	8,3	0,02	9,2
П-803-ZnO-(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (650C)			12,3	0,04	15,2
П-803-ZnO-NaOH	NaOH		9,4	0,03	14,8
П-803-ZnO-NaOH (650C)			27,6	0,06	9,7



Данные, представленные в таблице, показывают, что поверхностная модификация частиц углеродной основы оксидом цинка методом пропитки, с использованием в качестве прекурсора оксидной фазы нитрата цинка, приводит к незначительному повышению значения удельной поверхности.

Образцы, полученные с помощью метода химического осаждения с применением хлорида цинка  $ZnCl_2$  и карбоната аммония  $(NH_4)_2CO_3$ , обладают менее развитой удельной поверхностью, в том числе по сравнению с немодифицированной углеродной основой. Повышение температуры прокаливания до  $650\text{ }^\circ\text{C}$  способствует незначительному росту значения удельной поверхности, общего объема и диаметра пор исследуемого образца. Замена химического осадителя с карбоната аммония на гидроксид натрия не оказывает принципиального влияния на текстурные параметры получаемых образцов. Однако в данном случае повышение температуры термообработки оказывает более значительный эффект, обеспечивая получение образца поверхностно-модифицированного углеродного носителя с развитыми текстурными характеристиками.

Таким образом, рассмотрены два метода нанесения оксида цинка на поверхность частиц углеродного носителя – пропитки и химического осаждения. Изучено влияние прекурсоров оксидной фазы, вида щелочного осадителя и температурных режимов прокаливания на фазовый состав оксидной составляющей синтезируемых образцов. Показано, что образец, полученный методом пропитки с использованием в качестве прекурсора оксидной составляющей нитрата цинка, позволяет сформировать на поверхности частиц углеродного носителя оксид цинка в фазе цинкита со средним размером кристаллитов около  $15\text{ нм}$ .

Фазовый состав образцов, полученных методом химического осаждения с использованием в качестве прекурсора оксидной составляющей хлорида цинка вне зависимости от вида щелочного осадителя и температуры прокаливания является более многообразным и представлен сложными комплексными соединениями. При этом искомой фазы оксида цинка в данных образцах обнаружено не было.

Образец поверхностно-модифицированного углеродного носителя оксидом цинка, полученный методом пропитки с использованием в качестве прекурсора оксидной фазы нитрата цинка обладает текстурными параметрами, близкими к значениям, полученным для немодифицированной углеродной основы. Образцы, полученные с использованием в качестве прекурсора оксидной фазы хлорида цинка и карбо-

ната аммония в качестве щелочного осадителя, обладают менее развитыми текстурными параметрами. При этом повышение температуры прокаливания (до 650 °С) для образца полученного с использованием хлорида цинка и гидроксида натрия приводит к значительному росту удельной поверхности.

### Список литературы

1. Vaseem, M. ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Applications / M. Vaseem, A. Umar, Y. Hahn // *Journal of Materials Chemistry*. – 1988. – Vol. 22. – P. 6526–6535.
2. Formation, properties and applications of microalgae-based ZnO nanoparticles: A review / G.T. Tran, N.T.H. Nguyen, N.T.T. Nguyen, T.T.T. Nguyen, D.T.C. Nguyen, T. Van. Tran // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 11, № 5. – P. 110939.
3. Mishra, S. Effect of shape of ZnO nanoparticle on electro-optic and dielectric properties of nematic liquid crystal / S. Mishra, V. Manjuladevi, R.K. Gupta // *Journal of Molecular Liquids*. – 2023. – Vol. 386. – P. 122482.
4. A simple and efficient voltammetric sensor for dopamine determination based on ZnO nanorods/electro-reduced graphene oxide composite / F. Li, B. Ni, Y. Zheng, Y. Huang, G. Li // *Surfaces and Interfaces*. – 2021. – Vol. 26. – P. 101375.
5. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material / D. Klemm, B. Heublein, H.P. Fink, A. Bohn // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2005. – Vol. 44. – P. 3358–3393.
6. From CO<sub>2</sub> to methanol by hybrid QM/MM embedding / S.A. French, A.A. Sokol, S.T. Bromley, C.R.A. Catlow, S.C. Rogers, F. King, P. Sherwood // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2001. – Vol. 40. – P. 4437–4440.
7. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process / S. Mostoni, P. Milana, B. Di Credico, M. D'ariento, R. Scotti // *Catalysts*. – 2019. – Vol. 9, № 8. – P. 664–686.
8. Influence of zinc oxide during different stages of sulfur vulcanization. Elucidated by model compound studies / G. Heideman, J. Noordermeer, R.N. Datta, B. Baarle // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2005. – Vol. 95, № 6. – P. 1388–1404.
9. Heideman, G. Reduced Zinc Oxide Levels in Sulphur Vulcanisation of Rubber Compounds / G. Heideman // *Enschede: University of Twente*. – 2004. – P. 197.
10. Mark, J.E. *Vulcanization in Science and Technology of Rubber* / J.E. Mark, B. Erman, F.R. Eirich // *Academic Press, San Diego*, 1994. – P. 339–385.
11. Water-resistant surfaces using zinc oxide structured nanorod arrays with switchable wetting property / H. Ennaceri, L. Wang, D. Erfurt, W. Riedel, G. Mangalgi, A. Khaldoun, A. El Kenz, A. Benyoussef, A. Ennaoui // *Surface and Coatings Technology*. – 2016. – Vol. 299. – P. 169–176.

12. Ecotoxicological, ecophysiological, and mechanistic studies on zinc oxide (ZnO) toxicity in freshwater environment / P. Sanpradit, E. Byeon, J.-S. Lee, S. Peerakietkhajorn // *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. – 2023. – Vol. 273. – P. 109720.

13. Plagge, J. Filler-polymer interaction investigated using graphitized carbon blacks: Another attempt to explain reinforcement / J. Plagge, A. Lang // *Polymer*. – 2018. – Vol. 218. – P. 123513.

14. Fan, Y. The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler – A review / Y. Fan, G.D. Fowler, M. Zhao // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 247. – P. 119115.

15. Birks, L.S. Particle size determination from X-Ray line broadening / L.S. Birks, H. Friedman // *Journal of Applied Physics*. – 1946. – Vol. 17. – P. 687–692.

## References

1. Vaseem M., Umar A., Hahn Y. ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Applications. *Journal of Materials Chemistry*. 1988. Vol. 22. pp. 6526–6535.

2. Tran G.T., Nguyen N.T.H., Nguyen N.T.T., Nguyen T.T.T., Nguyen D.T.C., Tran T. Van. Formation, properties and applications of microalgae-based ZnO nanoparticles: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023. Vol. 11. No. 5. 110939 p.

3. Mishra S., Manjuladevi V., Gupta R.K. Effect of shape of ZnO nanoparticle on electro-optic and dielectric properties of nematic liquid crystal. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. Vol. 386. 122482 p.

4. Li F., Ni B., Zheng Y., Huang Y., Li G. A simple and efficient voltammetric sensor for dopamine determination based on ZnO nanorods/electro-reduced graphene oxide composite *Surfaces and Interfaces*. 2021. Vol. 26. 101375 p.

5. Klemm D., Heublein B., Fink H.P., Bohn A. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material *Angewandte Chemie International Edition*. 2005. Vol. 44. pp. 3358–3393.

6. French S.A., Sokol A.A., Bromley S.T., Catlow C.R.A., Rogers S.C., King F., Sherwood P. From CO<sub>2</sub> to methanol by hybrid QM/MM embedding *Angewandte Chemie International Edition*. 2001. Vol. 40. pp. 4437–4440.

7. Mostoni S., Milana P., Di Credico B., D'ariento M., Scotti R. Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process *Catalysts*. 2019. Vol. 9. No 8. pp. 664–686.

8. Heideman G., Noordermeer J., Datta R.N., Baarle B. Influence of zinc oxide during different stages of sulfur vulcanization. Elucidated by model compound studies *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 95. No 6. pp. 1388–1404.

9. Heideman G. Reduced Zinc Oxide Levels in Sulphur Vulcanisation of Rubber Compounds *Enschede: University of Twente*. 2004. 197 p.

10. Mark J.E., Erman B., Eirich F.R. Vulcanization in Science and Technology of Rubber *Academic Press, San Diego*. 1994. pp. 339–385.

11. Ennaceri H., Wang L., Erfurt D., Riedel W., Mangalgi G., Khaldoun A., El Kenz A., Benyoussef A., Ennaoui A. Water-resistant surfaces using zinc oxide structured nanorod arrays with switchable wetting property *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 299. pp. 169–176.

12. Sanpradit P., Byeon E., Lee J.-S., Peerakietkhajorn S. Ecotoxicological, ecophysiological, and mechanistic studies on zinc oxide (ZnO) toxicity in freshwater environment *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2023. Vol. 273. 109720 p.

13. Plagge J., Lang A. Filler-polymer interaction investigated using graphitized carbon blacks: Another attempt to explain reinforcement *Polymer*. 2018. Vol. 218. 123513 p.

14. Fan Y., Fowler G.D., Zhao M. The past, present and future of carbon black as a rubber reinforcing filler – A review *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 247. 119115 p.

15. L.S. Birks, H. Friedman Particle size determination from X-Ray line broadening *Journal of Applied Physics*. 1946. Vol. 17. pp.687-692.

### Об авторах

**Козлов Леонид Сергеевич** (Пермь, Россия) – генеральный директор, Федеральное казенное предприятие «Пермский пороховой завод» (614113, г. Пермь, ул. Гальперина, 11).

**Ухин Константин Олегович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: Ukhin\_k@mail.ru).

**Савастьянова Мария Анатольевна** (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: mariysav75@gmail.com).

**Вальцифер Виктор Александрович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: valtsiferv@mail.ru).

**Стрельников Владимир Николаевич** (Пермь, Россия) – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3).

### **About the authors**

**Leonid S. Kozlov** (Perm, Russian Federation) – CEO, The Perm Gunpowder Factory FKP (11, str. Galperin, Perm, 614113).

**Konstantin O. Ukhin** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences as affiliated branch of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, str. Akademik Korolev, Perm, 614013, e-mail:Ukhin\_k@mail.ru).

**Mariya A. Savastyanova** (Perm, Russian Federation) – Junior researcher, Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences as affiliated branch of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, str. Akademik Korolev, Perm, 614013, e-mail: mariysav75@gmail.com).

**Victor A. Valtsifer** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences as affiliated branch of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, str. Akademik Korolev, Perm, 614013, e-mail: valtsiferv@mail.ru).

**Vladimir N. Strelnikov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Technical Chemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences as affiliated branch of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (3, str. Akademik Korolev, Perm, 614013, e-mail: valtsiferv@mail.ru).

Поступила: 26.04.2024

Одобрена: 02.06.2024

Принята к публикации: 13.06.2024

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 124022200039-7.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Исследование влияния метода получения на текстурно-структурные свойства оксида цинка, высаженного на поверхность частиц углеродного носителя / Л.С. Козлов, К.О. Ухин, М.А. Савастьянова, В.А. Вальцифер, В.Н. Стрельников // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 2. – С. 32–44.

Please cite this article in English as:

Kozlov L.S., Ukhin K.O., Savastyanova M.A., Valcifer V.A., Strelnikov V.N. Investigation of the effect of the production method on the textural and structural properties of zinc oxide deposited on the surface of carbon carrier particles. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 2, pp. 32-44 (*In Russ*).