

## Исследование влияния суспензии технического углерода на характеристики фторангидритовой матрицы

Анастасия Федоровна Гордина , Александр Николаевич Гуменюк\* , Ирина Сергеевна Полянских ,  
Регина Ильшатовна Зарипова 

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: [gumeniuk.an@gmail.com](mailto:gumeniuk.an@gmail.com)

**АННОТАЦИЯ: Введение.** Тенденции в области повышения функциональной нагрузки строительных материалов и необходимость широкого внедрения электропроводящих бетонов требуют повышения экономической эффективности, которого можно достигнуть за счет применения техногенных отходов. В то же время регулирование электротехнических характеристик композиционных материалов на основе вяжущих материалов техногенного происхождения является актуальной, малоизученной проблемой. При этом особый интерес представляет роль высокодисперсной части компонентов добавок, используемых в качестве модификаторов структуры и свойств композиционных материалов. **Материалы и методы.** Для исследования возможностей регулирования электротехнических свойств матрицы изготавливались составы на основе фторангидрита, сульфата натрия, в качестве активатора твердения и суспензии UPC-MIX-1, в качестве электропроводящей добавки. Исследовано влияние суспензии UPC-MIX-1 на электротехнические показатели и структурообразование минеральной матрицы, содержащей дисперсные частицы технического углерода. Определена полидисперсная природа модифицирующей добавки и соотношение нанодисперсной и микродисперсной части твердой фазы. Показатели для расчета удельного объемного электрического сопротивления определялись зондовым методом. Влияние дисперсной добавки на характеристики фторангидритового композита оценивалось стандартными лабораторными методами. Особенности структурообразования оценивались с помощью методов физико-химического анализа. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что фторангидритовое вяжущее, активированное сульфатом натрия, обладает достаточными физико-механическими показателями для использования в качестве альтернативы гипсового вяжущего. При этом модификация предлагаемого состава электропроводящей добавкой повышает показатели механической прочности: на изгиб на 51%, прочность на сжатие увеличивается на 65%. Кроме того, улучшаются гидрофизические свойства композита. Так, коэффициент размягчения образцов состава FD-4 увеличивается на 39%, водопоглощение по массе снижается на 36%. В свою очередь, при введении 8% электропроводящей добавки удельное объемное электрическое сопротивление снижается на 49–52% и составляет 13,6 кОм·см. Основные изменения физико-технических параметров представленного композита обусловлены значительными изменениями физико-химических свойств, включая особенности структурообразования. **Выводы.** Разработанные составы требуют дополнительной оптимизации для применения в качестве нагревательного элемента, при этом достигнутой электропроводности достаточно для нивелирования электростатического эффекта наливных полов. Установлены закономерности формирования структуры фторангидритового композита, которые проявляются в формировании большего количества контактов срастания кристаллогидратных новообразований, обеспечивающихся наличием нанодисперсной части в модифицирующей добавке.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** фторангидрит, электропроводность, активатор твердения, модифицирующая добавка, микроструктура, структурообразование, дисперсия, технический углерод, нанодисперсные частицы.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ (грант МК-3391.2022.4).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Гордина А.Ф., Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Зарипова Р.И. Исследование влияния суспензии технического углерода на характеристики фторангидритовой матрицы // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 5. С. 381–391. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-5-381-391>. – EDN: NDYIGI.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Azad N.M., Samarakoon S.M. Utilization of Industrial By-Products / Waste to Manufacture Geopolymer Cement / Concrete. *Materials Science, Engineering*. 2021, 13(2), 873. <https://doi.org/10.3390/su13020873>

© Гордина А.Ф., Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Зарипова Р.И., 2022

2. Joseph C.G., Taufiq-Yap Y.H., Krishnan V., Li Puma G. Application of modified red mud in environmentally-benign applications: A review paper. *Environmental Engineering Research*, 2022, 25(1), 795–806. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.374>
3. Katrijn Gijbels, Yiannis Pontikes, Pieter Samyn, Sonja Schreurs, Wouter Schroyers Effect of NaOH content on hydration, mineralogy, porosity and strength in alkali/sulfate-activated binders from ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum. *Constructions*, 2020, 10(2), 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106054>
4. Arunothayan A.R., Nematollahi B., Ranade R., Khayat K.H., Sanjayan J.G. Digital fabrication of eco-friendly ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125, 104281. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104281>
5. Rosales J., Gázquez M., Cabrera M., Bolivar J.P., Francisco Agrela. 6 – Application of phosphogypsum for the improvement of eco-efficient cements / In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Waste and Byproducts in Cement-Based Materials, Engineering, 2021, p. 153–189. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00016-4>
6. Maksim Kamarou, Natalia Korob, Witold Kwapinski, Valentin Romanovski. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, 100, 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.006>
7. Palomo A., Maltseva O., Garcia-Lodeiro I., & Fernández-Jiménez A. (2021). Portland Versus Alkaline Cement: Continuity or Clean Break: «A Key Decision for Global Sustainability». *Frontiers in Chemistry*, 653.
8. Valentin Romanovski, Andrei Klyndyuk, Maksim Kamarou. Green approach for low-energy direct synthesis of anhydrite from industrial wastes of lime mud and spent sulfuric acid. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2021, 9, 6, 106711. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106711>
9. Будников П.П., Зорин С.П. Ангидритовый цемент. М.: Промстройиздат, 1954. 90 с.
10. Brencich A., Łatka D., Matysek P., Orban Z., Sterpi E. Compressive strength of solid clay brickwork of masonry bridges: Estimate through Schmidt Hammer tests. *Construction and Building Materials*, 2021, 306, 124494.
11. Zhakupova G., Sadenova M.A., Varbanov P.S., Possible Alternatives for Cost-Effective Neutralisation of Fluoroanhydrite Minimising Environmental Impact. *Chemical Engineering Transactions*, 2019, 76, 1069-1074. <https://doi.org/10.3303/CET1976179>
12. Rosales J., Gázquez M., Cabrera M., Bolivar J. P., Agrela F. Application of phosphogypsum for the improvement of eco-efficient cements. *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials*, 2021, pp. 153-189. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00016-4>
13. Kamarou M., Korob N., Kwapinski W., Romanovski V. High-quality gypsum binders based on synthetic calcium sulfate dihydrate produced from industrial waste. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021 100, 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.006>
14. Rajković M., Tošković D.V. (2002). Investigation of the possibilities of phosphogypsum application for building partitioning walls-elements of a prefabricated house. *Acta periodica technologica*, 2002, (33), 71–92. <https://doi.org/10.2298/APT0233071R>
15. Romanovski V., Klyndyuk A., Kamarou M. Green approach for low-energy direct synthesis of anhydrite from industrial wastes of lime mud and spent sulfuric acid. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021 9(6), 106711. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106711>
16. Gracioli B., Angulski da Luz C., Beutler C.S., Pereira Filho J.I., Frare A., Rocha J.C., Cherif M., Hooton R.D. Influence of the calcination temperature of phosphogypsum on the performance of supersulfated cements. *Construction and Building Materials*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119961>
17. Singh N.B. The activation effect of K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the hydration of gypsum anhydrite, CaSO<sub>4</sub>(II). *Journal of the American Ceramic Society*. 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00020.x>
18. Fedorchuk Y.M., Zamyatin N.V., Smirnov G.V., Rusina O.N., Sadenova M.A. (2017). Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. 881, 1, p. 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/881/1/012039>
19. Zhakupova G., Sadenova M., Varbanov P.S. Possible alternatives for cost-effective neutralisation of fluoroanhydrite minimizing environmental impact. *Chemical engineering*, 76, 1069-1074. <https://doi.org/10.3303/CET1976179>
20. John L. Provis, Angel Palomo, Caijun Shi. Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78, Part A, 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
21. Liu S., Ouyang J., Ren J. Mechanism of calcination modification of phosphogypsum and its effect on the hydration properties of phosphogypsum-based supersulfated cement. *Construction and Building Materials*, 2020, 243, 118226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118226>

22. Guerra-Cossío M.A., González-López J.R., Magallanes-Rivera R.X., Zaldívar-Cadena A.A., Figueroa-Torres M.Z. Anhydrite, blast-furnace slag and silica fume composites: properties and reaction products. *Advances in Cement Research*, 31, 8, 2019, pp. 362–369. <https://doi.org/10.1680/jadcr.17.00216>
23. Kamarou M., Korob N., Romanovski V. Structurally controlled synthesis of synthetic gypsum derived from industrial wastes: sustainable approach. *Journal Chem Technol Biotechnol*, 2021, 96, 3134–3141. <https://doi.org/10.1002/jctb.6865>
24. Singh N.B. The activation effect of  $K_2SO_4$  on the hydration of gypsum anhydrite,  $CaSO_4$  (II). *Journal of the American Ceramic Society*, 2005 88(1), 196–201. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2004.00020.x>
25. Singh M., Garg M. Activation of fluorogypsum for building materials. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2009, 68(2), 130–134.
26. Heydar Dehghanpour, Kemalettin Yilmaz, Faraz Afshari, Metin Ipek, Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach, *Construction and Building Materials*, 2020, 260, 119948, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119948>
27. Magallanes-Rivera R.X., Escalante-García J.I. Anhydrite/hemihydrate-blast furnace slag cementitious composites: Strength development and reactivity. *Construction and Building Materials*. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.056>
28. Hong S.-H., Choi J.-S., Yuan T.-F., Yoon Y.-S. Mechanical and Electrical Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Steel Fibers. *Materials*2021, 14, 6505. <https://doi.org/10.3390/ma14216505>
29. Provis J.L., Palomo A., Shi C. Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78, 110–125. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
30. Bigdeli Y., Barbato M., Gutierrez-Wing M.T., Lofton C.D., Rusch K.A., Jung J., Jang J. Development of new pH-adjusted fluorogypsum-cement-fly ash blends: Preliminary investigation of strength and durability properties. *Construction and Building Materials*, 2018 182, 646–656. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.086>
31. Xiaoli Liu, Ming Qu, Alan Phong Tran Nguyen, Neil R. Dilley, Kazuaki Yazawa, Characteristics of new cement-based thermoelectric composites for low-temperature applications. *Construction and Building Materials*, 2021, 304, 124635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124635>
32. Dehghanpour H., Yilmaz K., Afshari F., Ipek M. Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach. *Construction and Building Materials*, 2020 260, 119948. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119948>
33. Dehghanpour H., Yilmaz K., Ipek M. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction and Building Materials*, 2019, 221, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025>
34. Hong S.H., Choi J.S., Yuan T.F., Yoon Y.S. Mechanical and Electrical Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Steel Fibers. *Materials*, 2021, 14(21), 6505. <https://doi.org/10.3390/ma14216505>
35. García-Macías E., Castro-Triguero R., Sáez A., Ubertini F. 3D mixed micromechanics-FEM modeling of piezoresistive carbon nanotube smart concrete. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018. 340, 396–423. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.05.037>
36. Al-Awsh W.A., Al-Amoudi O.S.B., Al-Osta M.A., Ahmad A., Saleh T.A. *Experimental assessment of the thermal and mechanical performance of insulated concrete blocks*. *Journal of Cleaner Production*, 2021 283, 124624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124624>
37. Liu X., Qu M., Nguyen A.P.T., Dilley N.R., Yazawa K. Characteristics of new cement-based thermoelectric composites for low-temperature applications. *Construction and Building Materials*, 2021, 304, 124635. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124635>
38. Tian Z., Li Y., Zheng J., Wang S. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 177, 107437. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107437>
39. Schultz J. Conductive material prevents build-up of static electricity. *AORN journal*, 1970, 27(6), 1226–1228. [https://doi.org/10.1016/S0001-2092\(07\)60644-9](https://doi.org/10.1016/S0001-2092(07)60644-9)
40. Kassebaum J.H., Kocken R.A. Controlling static electricity in hazardous (classified) locations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, 33(1), 209–215.
41. Garcia-Macias E., D'Alessandro A., Castro-Triguero R., Pérez-Mira D., Ubertini F. Micromechanics modeling of the electrical conductivity of carbon nanotube cement-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 108, 451–469. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.025>
42. Marco Liebscher, Lazaros Tzounis, Dominik Junger, Tin Trong Dinh, Viktor Mechtcherine. Electrical Joule heating of cementitious nanocomposites filled with multi-walled carbon nanotubes: role of filler concentration, water content, and cement age. *Smart Mater. Struct.* 2020. 29. 125019. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abc23b>

43. Hornbostel K., Larsen C.K., Geiker M.R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. *Cem. Concr. Compos.* 2013, 39, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>
44. Hong S.-H., Choi J.-S., Yuan T.-F., Yoon Y.-S. Mechanical and Electrical Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Steel Fibers. *Materials*, 2021, 14, 6505. <https://doi.org/10.3390/ma14216505>
45. Osama Zaid, Syed Roshan Zamir Hashmi, Fahid Aslam, Zain Ul Abedin, Asmat Ullah. Experimental study on the properties improvement of hybrid graphene oxide fiber-reinforced composite concrete. *Diamond and Related Materials*. 2022, 124, 108883. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108883>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гордина Анастасия Федоровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия, [afspirit@rambler.ru](mailto:afspirit@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8118-8866>

**Гуменюк Александр Николаевич** – старший преподаватель кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия, [gumeniuk.an@gmail.com](mailto:gumeniuk.an@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-2880-8103>

**Полянских Ирина Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия, [irina\\_maeva@mail.ru](mailto:irina_maeva@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1331-9312>

**Зарипова Регина Ильшатовна** – магистр кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия, [zarreg358@gmail.com](mailto:zarreg358@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-9227-142X>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Гордина А.Ф.** – идея и концепция исследования, разработка методологии, последующая доработка текста.

**Гуменюк А.Н.** – научное руководство, участие в разработке учебных планов и их реализации, последующая доработка текста, лабораторные испытания.

**Полянских И.С.** – разработка методики, написание проекта, окончательные выводы.

**Зарипова Р.И.** – сбор и обработка данных, лабораторные исследования.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.09.2022; одобрена после рецензирования 03.10.2022; принята к публикации 06.10.2022.