

DOI: 10.12737/23882

Лопанов А.Н., д-р техн. наук, проф.,  
Фанина Е.А., канд. техн. наук, доц.,  
Томаровищенко О.Н., ст. преп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ВЛИЯНИЕ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С УГЛЕРОДНОЙ ФАЗОЙ

ox.guzeeva@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования физико-механических характеристик углеводородсодержащих резистивных материалов на цементном вяжущем. Регулирование предела прочности на сжатие композитов производилось с помощью механохимических методов. Синтезирована модифицирующая добавка на основе эфиров поликарбоксилатов, солей железа и шунгита, позволяющая снизить водоцементное отношение и водопроницаемость электропроводного мелкозернистого бетона, а также увеличить прочностные характеристики составов. Исследована морфология новообразований в цементной матрице.

**Ключевые слова:** углерод, мелкозернистый бетон, резистивные композиты, электрообогреваемый пол, прочность при сжатии.

**Введение.** Основным подходом к повышению эффективности отопительных систем является внедрение энергосберегающих технологий, обеспечивающих рациональное снижение коэффициента потребления тепловой и электрической энергии. В настоящее время перспективным является поверхностный низкотемпературный обогрев, учитывающий физиологическое распределение температуры тела человека. В напольных и стеновых системах с лучистым обменом тепла находят широкое применение резистивные композиционные материалы на основе углерода, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики электрообогреваемых конструкций. Известно, что резистивные углеводородсодержащие композиты на цементном вяжущем обладают невысоким пределом прочности на сжатие за счет низкой адгезии между сырьевыми компонентами, поэтому спектр применения конструкций и систем на их основе постоянно сужается. Целью работы является синтезирование модифицирующей добавки для мелкозернистого электропроводного бетона, введение которой способствует формированию новообразований, обеспечивающих повышение физико-механических характеристик изделий.

**Методология.** Теоретической и методологической основой работы является комплексный анализ отечественных и зарубежных источников, патентно-технической литературы в области электротехнологий и строительного материаловедения. Методология также базируется на фундаментальных исследованиях по влиянию модифицирующих добавок на процессы структурообразования цементных композитов функционального назначения. Определение физико-

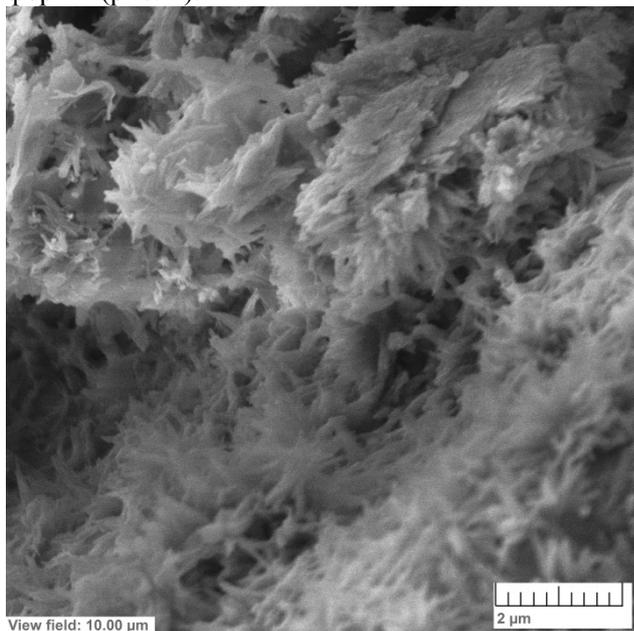
механических характеристик материалов производилось с использованием малогабаритного пресса ПГМ-500 МГ4, обработку результатов проводили в соответствии со стандартными методиками. Анализ морфологии сырьевых и синтезированных материалов выполнен с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN MIRA 3 LMU».

**Основная часть.** Механохимические методы перевода минерального сырья в неравновесное метастабильное состояние с образованием избыточной поверхностной энергии измельченного вещества в настоящее время получили широкое распространение. При механоактивационном диспергировании энергия, передаваемая частицам измельчаемого вещества, часто является избыточной и только часть этой энергии расходуется на повышение поверхностной энергии, а значительная ее часть идет на повышение внутренней энергии вещества. В процессе механоактивации происходит изменение энергии электронных возбуждений, что приводит к возникновению возбужденных состояний в атомной структуре и перемещениям атомов на поверхность кристаллической решетки диспергируемого материала. При этом изменение энергии электронных возбуждений зависит от продолжительности механического воздействия и ее импульса. При этом наблюдается переход атомов, на 1–2, реже на 3–4 межатомных промежутка. Из-за перемещения атомов относительно друг друга происходит искажение валентных углов в кристаллической решетке, что сопровождается повышением реакционной способности веществ. Таким образом, механическая активация может выступать эффективным мето-

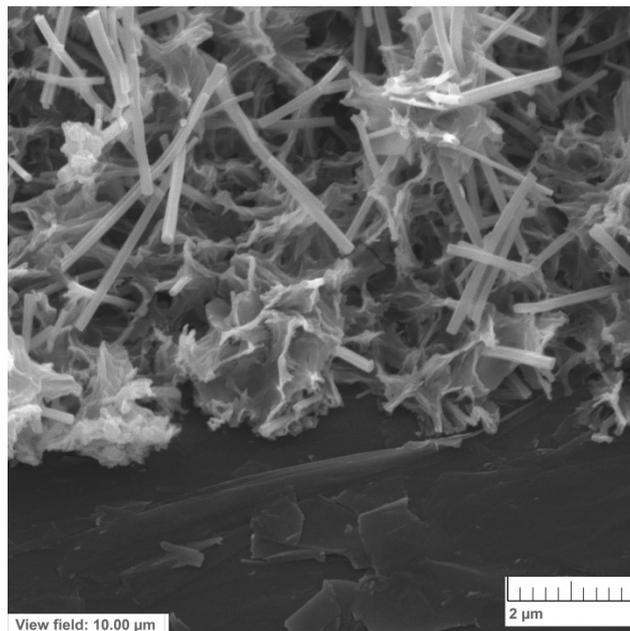
дом повышения поверхностной энергии и инициатором многих твердофазных реакций [1–5].

Таким образом, выбор механоактивационной диспергации в качестве технологического приема модифицирования поверхности кварцевого заполнителя и метода регулирования эксплуатационных характеристик резистивных материалов на цементном вяжущем обусловлен следующими факторами: экологическая безопасность и энергоэффективность технологии, возможность расширения сырьевой базы и повышение структурообразующей роли диспергированного сырья в твердом агрегатном состоянии [6–9]. В работе механическую активацию кварцевого песка (с исходной удельной поверхностью  $S_{уд} = 151 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) производили в шаровой планетарной мельнице РМ 100 до  $S_{уд} = 389 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Исследования микроструктуры углеродсодержащих композитов с использованием цементно-песчаных смесей, выполненные методом микроскопии показывают, что применение механоактивированного кварцевого песка способствует образованию новых центров кристаллизации в цементной матрице и изменению их формы (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура резистивных композиционных материалов с исходным (а) и механоактивированным (б) песком

Ранее проведенными исследованиями [10–13] установлена возможность повышения прочностных свойств мелкозернистых бетонов путем механоактивации заполнителя. Механоактивация кварцевого заполнителя положительно воздействует на формирование структуры при поздней кристаллизационной стадии цемента. Частицы молотого песка заполняют поры в структуре твердеющего цементного камня, спо-

Исследование кинетики набора прочности разработанных составов при сжатии проводили на образцах-кубах размером  $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$  в течение 28 суток нормального твердения. В состав цементно-песчаной смеси вводили углеродсодержащие компоненты (графит, антрацит, шунгит) и определяли влияние их массовой концентрации на физико-механические характеристики. В работе выявлено, что в области электрической проводимости при массовой доле углеродного компонента от 0,10 до 0,40 мас. предел прочности на сжатие снижается для графита, антрацита, шунгита соответственно с 8,1 до 0,6 МПа; с 8,7 до 0,9 МПа; с 9 до 1,38 МПа. Введение поверхностно-активных веществ на основе поликарбоксилатов и нафталинформальдегидов оказывает положительный эффект на регулирование электрических и прочностных характеристик резистивных материалов, позволяет снизить водоцементное отношение формовочных смесей и повысить плотность цементного камня. Полученные номограммы разработанных составов токопроводящих материалов представлены на рис. 2.

собствуют повышению его прочности, непроницаемости, долговечности цементного композита. В работе установлено, что применение механоактивированного кварцевого заполнителя позволяет увеличить прочность мелкозернистого электропроводного бетона с применением углеродсодержащих материалов (графита, антрацита, шунгита) на 40–50 % (рис. 3).

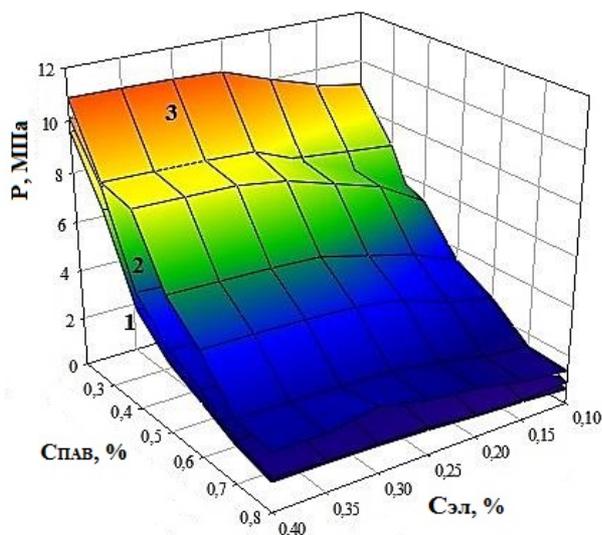


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие образцов резистивных материалов от содержания полиакрилатного пластификатора и токопроводящего компонента:  
1 – с графитом; 2 – с антрацитом; 3 – с шунгитом

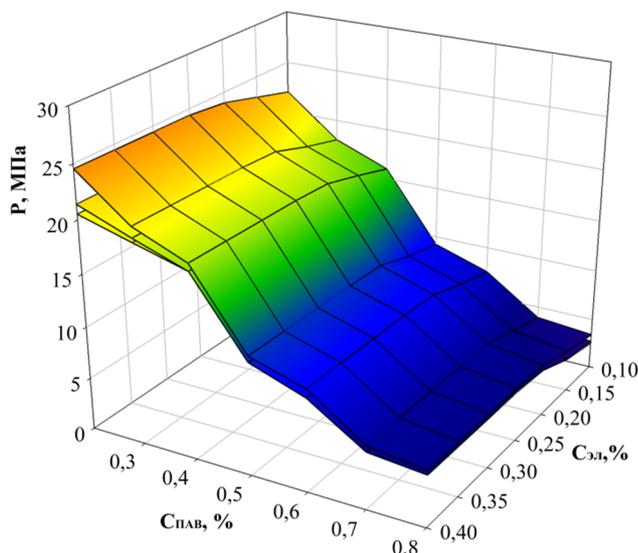


Рис. 3. Зависимость предела прочности на сжатие образцов резистивных материалов с механоактивированным кварцевым песком от содержания полиакрилатного пластификатора и токопроводящего компонента:  
1 – с графитом; 2 – с антрацитом; 3 – шунгитом

Также для увеличения предела прочности на сжатие в состав токопроводящей смеси ввели 3 % шунгита и 1 % хлорида железа (III). Применение хлорного железа в составе резистивного композита позволяет уменьшить водопроницаемость материала, а также способствует повышению предела прочности на сжатие и ускорению твердения бетона.

#### Выводы.

1. Повышение эффективности резистивных материалов на цементном вяжущем позволяет увеличить срок службы электрических нагревательных систем на их основе. С точки зрения

доступности, экономичности и эффективности наиболее перспективным является использование углеродсодержащих дисперсных материалов в качестве токопроводящей фазы.

2. Разработанный метод регулирования прочностных характеристик резистивных композитов обеспечивает возможность варьирования пределов прочности на сжатие материалов при всех значениях концентраций углеродного компонента.

3. Введение механоактивированного кварцевого заполнителя и модифицирующей добавки на основе эфиров поликарбоксилатов, хлорида железа и шунгита (с содержанием 0,4 мас. углерода) позволяет уменьшить водопроницаемость и увеличить прочность мелкозернистого электропроводного бетона в 2-2,5 раза.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукутцова Н.П., Пашаян А.А., Хомякова Е.Н. Исследование влияния добавок на основе травильных растворов, содержащих соли железа, на структуру и прочность мелкозернистого бетона // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 94–104.
2. Добшиц Л.М., Кононова О.В., Анисимов С.Н. Кинетика набора прочности цементного камня с модифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2011. № 4. С. 104–107.
3. Дергунов С.А., Рубцова В.Н. Роль пластифицирующих добавок в формировании свойств цементно-песчаных систем // СтройПРОФИль. 2009. № 7. С. 13–17.
4. Болдырев В.В., Аввакумов Е.Г., Болдырева Е.В. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 343 с.
5. Никифоров Л.А. Структура, механические и триботехнические свойства нанокompозитов на основе модифицированного природными силикатами сверхвысокомолекулярного полиэтилена дис. ... к-та техн. наук: 05.17.06. Комсомольск-на-Амуре, 2016. С. 33–35
6. Евтушенко Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов. Некоторые элементы структурной динамики. Монография. Белгород: Изд-во БелГТУ, 2003. 195 с.
7. Лопанова Е.А. Функциональные токопроводящие материалы на основе графита и силикатов: дис.... канд. техн. наук. Белгород. 2005. 142 с.
8. Попельнюхов С.Н., Железняк А.Р., Шубин К.С., Передреев М.А. Преимущества и особенности механоактивации сырьевых материалов при производстве сухих строительных смесей // «ALITinform» международное аналитиче-

ское обозрение. 2011. № 4. С 72-78.

9. Трубицын М.А., Габрук Н.Г., Ле В.Т., Доан В.Д. Синтез и исследование физико-химических и биологических свойств кремний-содержащего гидроксиапатита // III Международная научно-практическая конференция «Новые технологии создания и применения биокерамики в восстановительной медицине»: сб. материалов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: ВТСНТ, 2013. С. 166-170.

10. Жерновский И.В., Строкова В.В., Бондаренко А.И. Структурные преобразования кварцевого сырья при механоактивации // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 56–58

11. Горелов С.В. Электрическая проводимость резистивных композитов // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 6. С. 64-67.

12. Машкин Н.А., Гутарева Н.А., Зибницкая Н.Е., Урусова Т.А. Влияние активирования цементно-песчаных суспензий на физико-механические свойства мелкозернистых бетонов // Известия вузов. Строительство. 2012. №11–12. С. 26–33.

13. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Физико-химические процессы при активации цементно-песчаной смеси в центробежном смесителе // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. №11/3. С. 346–349.

---

**Lopanol A.N., Fanina E.A., Tomarovich O.N.**  
**THE IMPACT OF PRESCRIPTION-TECHNOLOGICAL FACTORS  
ON PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FINE-GRAINED  
CONCRETE WITH THE CARBON PHASE**

*The article presents the research results of physical and mechanical characteristics of carbon-containing resistive materials based on cement binder. The regulation limit of the compressive strength of the composites was carried out using mechanochemical methods. Synthesized modifying additive on the basis of ether polycarboxylates, salts of iron and of shungite to reduce water-cement ratio and permeability of conductive fine-grained concrete, as well as to improve the strength characteristics of the compositions. Studied the morphology of tumors in the cement matrix.*

**Key words:** carbon, fine-grained concrete, resistive composites, electrically heated floors, compressive strength.

---

**Лопанов Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: alopanol@yandex.ru

**Фанина Евгения Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: evgenia-@mail.ru

**Томаровщенко Оксана Николаевна**, аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
E-mail: ox.guzeeva@yandex.ru