

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.335

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250

Влияние минеральных порошков на свойства вяжущих систем

Мадина Шахидовна Саламанова^{1,2}, Магомед Рамзанович Нахаев³¹ Грозненский государственный нефтяной технический университет

имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова); г. Грозный, Россия;

² Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук;
г. Грозный, Россия;³ Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова; г. Грозный, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработка рецептур многокомпонентных вяжущих композиций с использованием минеральных добавок различной природы является актуальной задачей. Многокомпонентные вяжущие связки «портландцемент – минеральная добавка», «портландцемент – минеральная добавка – пластификатор» позволят расширить ассортимент линейки вяжущих, найти экономное практическое применение ресурсоемкому материалу, снизить расход энергоснабжения на высокотемпературную обработку, и все это не в ущерб эксплуатационным показателям бетона и железобетона.

Материалы и методы. Согласно нормативно-техническим документам ГОСТ 31108, ГОСТ 20515 рекомендуется использовать в качестве компонента вяжущих систем тонкодисперсные добавки как природного, так техногенного происхождения, не оказывающие вредного влияния на свойства цементного теста и камня.

Результаты. Представлены топологические модели многокомпонентной вяжущей системы, отличающиеся в зависимости от природы и гранулометрии минерального порошка наполнителя. На основании проведенных исследований приведены модели диффузионной межфазовой зоны цементного камня, состоящей из прореагировавшей клинкерной и минеральных составляющих; пограничные слои которых отличаются присутствием в составе новообразований гидратных силикатов кальция и микропор различной конфигурации. Качественный состав пограничной межфазовой зоны определяется природой и реакционной способностью наполнителя.

Выводы. Анализ результатов показал, что соответствующий химико-минералогический состав, наличие ионообменных центров и высокий коэффициент активности способствуют повышению реакционной способности минеральных добавок, что важно для создания прочной вяжущей наполненной связки, необходимой для организации монолитного высотного строительства с конструктивными элементами сложной герметической конфигурации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: минеральный порошок, бетонный брак, многокомпонентное вяжущее, топологическая модель, межфазовая зона, пограничный слой, активная добавка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Саламанова М.Ш., Нахаев М.Р. Влияние минеральных порошков на свойства вяжущих систем // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 8. С. 1241–1250. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250

Автор, ответственный за переписку: Мадина Шахидовна Саламанова, madina_salamanova@mail.ru.

Influence of mineral powders on the properties of binding systems

Madina Sh. Salamanova^{1,2}, Magomed R. Nakhaev³¹ Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov (GSOTU named after academician M.D. Millionshchikov); Grozny, Russian Federation;² Complex Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences;
Grozny, Russian Federation;³ Chechen State University named after A.A. Kadyrov; Grozny, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Development of formulations of multicomponent binder compositions with the use of mineral additives of different nature is an urgent task. Multicomponent binders, "Portland cement – mineral additive", "Portland cement – mineral additive – plasticizer" allow to expand the range of binders, to find economical practical application of resource-intensive material, to reduce energy consumption for high-temperature processing, and all this not to the detriment of the operational indicators of concrete and reinforced concrete.

Materials and methods. According to the regulatory and technical documents GOST 31108, GOST 20515, it is recommended to use finely dispersed additives of both natural and anthropogenic origin as a component of binding systems, which do not have a harmful effect on the properties of cement paste and stone.

Results. Topological models of multicomponent binder system, which differ depending on the nature and granulometry of mineral powder. On the basis of the conducted researches, the models of the diffusion interphase zone of cement

stone, consisting of reacted clinker and mineral components, are presented; the boundary layers of which are characterized by the presence of calcium hydrate silicates and micropores of different configuration in the composition of neoplasms. The qualitative composition of the boundary interphase zone is determined by the nature and reactivity of the filler.

Conclusions. The analysis of the results showed that the appropriate chemical and mineralogical composition, the presence of ion-exchange centers and high activity coefficient contribute to an increase in the reactivity of mineral additives, which is important for the creation of strong binder, necessary for the organization of monolithic high-rise construction with structural elements of complex hermetic configuration.

KEYWORDS: mineral powder, defective concrete, multicomponent binder, topological model, interphase zone, boundary layer, active additive

FOR CITATION: Salamanova M.Sh., Nakhaev M.R. Influence of mineral powders on the properties of binding systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1241-1250. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1241-1250 (rus.).

Corresponding author: Madina Sh. Salamanova, madina_salamanova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Производство самого востребованного и незаменимого в строительстве материала — портландцемента (ПЦ) связано с огромным потреблением природного и энергетического ресурса, непоправимым негативным воздействием на окружающую среду [1, 2]. Научное сообщество рассматривает замену карбонатной технологии и разработку альтернативного вяжущего, позволяющего отказаться полностью или частично от дорогого и экологически вредного продукта. Поэтому создание рецептур многокомпонентных вяжущих композиций с использованием минеральных добавок (МД) различной природы является актуальной и перспективной задачей. Разработка многокомпонентных вяжущих составов «портландцемент — минеральная добавка», «портландцемент — минеральная добавка — пластификатор» позволит расширить ассортимент, найти экономное практическое применение ресурсоемкому материалу, снизить расход энергозатрат на высокотемпературную обработку, и все это не в ущерб эксплуатационным показателям бетона и железобетона. Синтезом многокомпонентных вяжущих занимались многие известные ученые, полученные результаты подтверждают эффективность и уникальность данного материала, ведь полученные композиции отличались повышенной водостойкостью, низкой экзотермичностью, высокой прочностью и долговечностью, и все это благодаря активным составляющим МД, связывающим гидролизную известь в гидратные соединения труднорастворимых силикатов кальция различной основности [1–8].

Активными минеральными добавками (АМД) пользовались строители еще в древние времена за 2600–3000 лет до н. э., тонкоизмельченные горные породы пытались обжигать и добавлять в строительную воздушную известь и гипс. Примерами могут служить бетонная галерея легендарного лабиринта в Древнем Египте, фундаменты сооружений в Мексике, Великая Китайская стена, римский Пантеон, и это только некоторые уникальные постройки, сохранившиеся до наших дней. Добавляя в известковые растворы обожженную молотую глину, вулканический пепел и туф, глиежи и опоку, повышали водостойкость и прочность изделий.

Нормативный документ ГОСТ 31108 рекомендует использовать в качестве компонента вяжущих следующие тонкодисперсные добавки: доменный шлак черной металлургии, золу уноса, вулканические породы, микрокремнезем, глиежи и обожженные сланцы, известняк, кварцевые пески, доломит, не оказывающие вредного влияния на свойства цементного теста и камня. ГОСТ 20515 дает разъяснения терминологии АМД по реакционной активности:

- пуццолановые, способные в тонкодисперсном состоянии в присутствии окиси кальция проявлять гидравлические свойства;
- гидравлические, способные в тонкодисперсном состоянии при затворении водой после предварительного твердения на воздухе или без него продолжать твердеть в воде и на воздухе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Классификация МД техногенной природы, предложенная комитетом 73–SBC RILEM, выделяет следующие виды наполнителей:

- доменные гранулированные шлаки, обладающие вяжущими свойствами, содержат значительное количество стекловидной фазы (до 90–95 %), имеющей в своей структуре ионы кремния, кальция, магния и алюминия;
- высококальциевая зола уноса характеризуется вяжущими и пуццолановыми свойствами, содержит в своем составе 70–80 % стекловидной фазы, имеющей в структуре ионы кальция, магния и алюминия; а также содержит свободную известь, периклаз, кварц и углерод < 2 %;
- микрокремнезем, обладающий высокими пуццолановыми свойствами, некристаллической структурой, с присутствием аморфной субстанции;
- низкокальциевая зола уноса с присутствием оксида кальция < 10 % обладает пуццолановыми свойствами, химико-минералогический состав характеризуется стекловидной фазой, содержащей ионы алюминия и железа, кристаллы кварца, муллита, магнезита, углерода до 5–10 %.

Приведенная классификация характеризует пуццолановую активность минеральных компонентов, ее влияние на свойства и структуру сформированного цементного камня (ЦК). Природные АМД

(обожженные каолиновые глины, опока, глиежи, вулканический пепел, туф, диатомиты) также обладают высокой пуццолановой активностью, которая определяется термодинамической нестабильностью реакционноспособных аморфных фаз [5, 6]. Использование такого технологического приема для получения многокомпонентных систем, как механоактивация или механохимическая активация вяжущего и природных добавок, позволит кардинально изменять свойства строительных композитов, открывая новые возможности, это:

- повышение стойкости к истиранию;
- снижение расхода ПЦ до 200–460 кг/м³;
- прирост прочности до 60–80 МПа и более, это касается и мелкозернистых бетонов;
- получение высокой ранней прочности в условиях естественного твердения;
- повышение подвижности бетонной смеси до ПЗ и П4, не ухудшая связность;
- увеличение антикоррозионной стойкости, непроницаемости и сульфатостойкости;
- достижение морозостойкости марок F200–F600 и более со специальными добавками.

Для проведения экспериментальных исследований были приготовлены минеральные порошки, полученные тонким измельчением природных горных пород и бетонного производственного брака. Остатки производственного бетонного лома скапливаются на территории завода с последующим вывозом на свалки, но, учитывая высокий класс проектного бетона В40, необходимо как с экологической, так и с технической стороны найти применение непрореагировавшей части клинкерного фонда в этом материале. В качестве природных добавок исследовались достаточно распространенные в регионе породы, такие как высококварцевые пески, вулканический пепел и опока. Механическую активацию осуществляли на протяжении 60 мин в лабораторной трубной вибромельнице ВМ–20. Для выявления зависимости удельной поверхности минеральных порошков от продолжительности измельчения пробы полученных добавок изучались на приборе ПСХ–12 (диапазон измерений составил 200–50 000 см²/г). Измельчение в трубной вибромельнице привело к получению минеральных порошков высокой степени дисперсности, о чем свидетельствуют числовые значения удельных поверхностей на всех промжутках отбора проб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механоактивированные добавки, обладающие определенной долей аморфной фазы при гидратном контакте с прочными и твердыми минералами цементного клинкера, в диффузионной межфазовой зоне располагают свойствами, схожими со свойствами вяжущего материала, образуя в итоге надежный и гарантированный структурный каркас затвердевшего ЦК [7–9]. Результаты исследований [10–14] установлено, что в многокомпонентной вяжущей системе с использованием тонкодисперсных АМД в процессе гидратации мельчайшие частички, адсорбируя воду, заполняют прослойки между более крупными частицами ПЦ, создавая тем самым более вязкопластичную среду, в сравнении со связкой «портландцемент – вода», способную к образованию равновесия «уменьшение объема свободной воды в среде – увеличение количества слабых коагуляционных контактов». В начальный период особого влияния химико-минералогический состав микронаполнителя не сказывается на процессе структурообразования из-за незначительности объема новообразований, но в последующем происходит нарушение равновесия в сторону формирования более стабильных мелкокристаллических кристаллогидратов низкоосновных гидросиликатов кальция C–S–H (I).

Изучению процессов гидратации в наполненных цементных системах посвящено много работ [13–18], результаты исследований подтверждают, что тонкодисперсные минеральные порошки в большей мере взаимодействуют с минералами вяжущих и в зонах диффузионного контакта образуются гидратные новообразования смешанного состава. Механизм взаимодействия компонентов вяжущей системы можно охарактеризовать в виде моделей, представленных на рис. 1.

Рассматривая все возможные варианты вяжущих, следует выделить композиционные гипсовые системы, в которых ключевую роль выполняют кристаллогидраты двуводного сульфата кальция, а микрзерна минерального порошка заполняют поровое пространство, улучшая структуру камня, делая ее более плотной и прочной [19, 20].

На морфологический состав и структуру новообразований в диффузионной зоне и пограничном слое наполнителя влияют различные факторы,

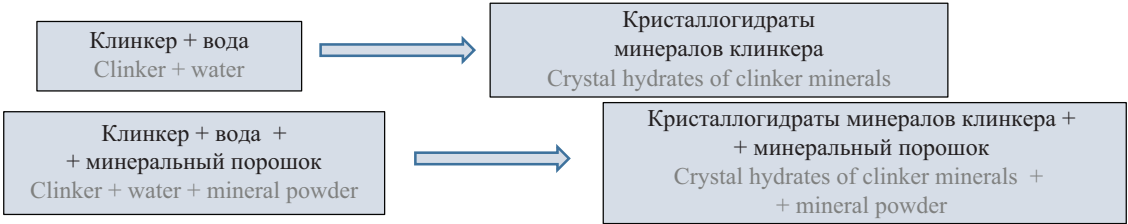


Рис. 1. Механизм взаимодействия компонентов вяжущей системы
Fig. 1. The mechanism of interaction between the components of the binding system

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 8, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 8, 2023

но структуроопределяющими можно считать природу основного вяжущего, степень его дисперсности и соответственно минерального порошка. Если рассмотреть модель структуры в пограничной зоне адгезии ЦК на основе известково-кремнеземистого вяжущего, то следует отметить изменчивость в составе новообразований (рис. 2). И связано это с более сложным процессом структурообразования, зависящим в значительной степени от условий протекания химического взаимодействия, к тому же надо рассматривать такие факторы, как твердость минерала порошка, удельная поверхность, продолжительность теплового воздействия и др. В известково-кремнеземистом вяжущем, если использовать в качестве кремнеземистого компонента плотные кварцевые породы высокой степени дисперсности, то это способствует повышению растворимости кремнезема в условиях воздействия высоких температур и давления, насыщенного водяного пара. Именно гидротермальная (автоклавная) обработка создает соответствующую атмосферу для увеличения контактной межфазовой зоны и синтеза в пограничном слое соединений типа C–S–H (I) гидросиликатов кальция низкой основности. Если в качестве кремнеземистого компонента применять породы пористой органогенной структуры с определенной долей аморфной составляющей, такие как диатомит, опока, трепел, то состав новообразований в пограничной межфазовой зоне будет представлен тоберморитподобными соединениями, образованными химическим взаимодействием активного кремнезема и гидроксида кальция [14].

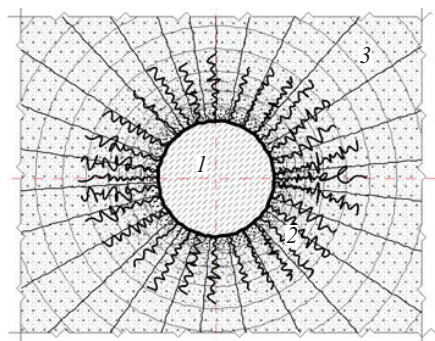


Рис. 2. Модель межфазовой пограничной зоны в известково-кремнеземистых композициях: 1 — частицы кварцевой муки; 2 — пограничный слой в виде геля SH + CSH; 3 — объемная фаза извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Fig. 2. Model of interphase boundary zone in lime-silica compositions: 1 — particles of quartz flour; 2 — boundary layer in the form of SH + CSH gel; 3 — bulk phase of lime $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Таким образом, важность применения МД — порошков не вызывает сомнений, в зависимости от происхождения основополагающих минералов наполнителя можно выделить следующие функции этого компонента:

- заполнитель ЦК по В.Н. Юнгу — микробетон;
- химически контактирует с минералами вяжущего в присутствии воды с образованием кристаллогидратов;

- кристаллическая затравка для частиц вяжущего, используемая при совместном тонком измельчении с цементом, активизируя обменные центры.

Для визуального восприятия предлагается модель наполненной системы (рис. 3), в которой частицы минерального порошка не вступают во взаимодействие с зернами ПЦ, явно наблюдается значительная разница в размерах частиц наполнителя и цемента [4].

Топологическая модель вяжущей системы, наполненной активным минеральным порошком полидисперсной гранулометрии (рис. 4), представлена диффузионной межфазовой зоной, состоящей из прореагировавшей клинкерной и минеральных составляющих; пограничные слои отличаются присутствием в составе новообразований гидратных силикатов кальция и микропор различной конфигурации. Качественный состав пограничной межфазовой зоны определяется природой и реакционной способностью наполнителя. Наполнение цементной системы минеральным порошком из осадочных карбонатных пород, таких как известняк, мел, доломит, ракушечник, магнезит, в процессе гидратации способствует синтезу соединений типа гидрокарбонаты кальция и магния $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ соответственно. Введение в систему тонкодисперсных алюмосиликатных порошков позволит получать гидрокарбоалюмосиликаты $4\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot m\text{CO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ и гидрокарбоалюминаты $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{CO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ кальция [14].

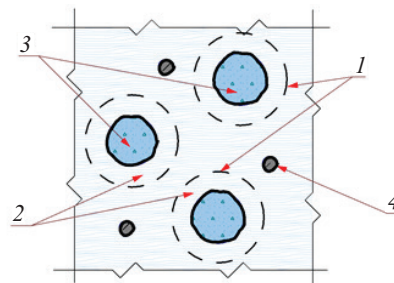


Рис. 3. Модель наполненной системы: 1 — зерна клинкера; 2 — прореагировавшая межфазная зона; 3 — непрореагировавшая часть клинкера; 4 — частички минерального порошка

Fig. 3. Model of the filled system: 1 — clinker grains; 2 — reacted interfacial zone; 3 — unreacted part of clinker; 4 — mineral powder particles

Топологическая модель вяжущей системы, наполненной тонкодисперсным активным порошком с размерностью микрочастиц от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-9}$ м (рис. 5), характеризуется тем, что микрочастицы поглощаются в процессе гидратационного взаимодей-

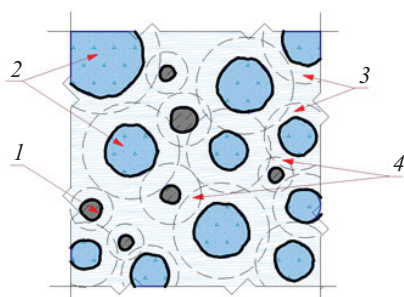


Рис. 4. Модель наполненной полидисперсным порошком вяжущей системы: 1, 2 — непрореагировавшие части зерен клинкера и порошка; 3 — прореагировавшая часть зерна клинкера; 4 — межфазовая зона вяжущего и наполнителя

Fig. 4. Model of binder system filled with polydisperse powder: 1, 2 — unreacted parts of clinker grains and powder; 3 — reacted part of clinker grains; 4 — interphase zone of binder and filler

ствия частицами ПЦ, повышая тем самым содержание и дисперсность кристаллогидратов C–S–H на гелиевом и кристаллическом уровнях. Тонкодисперсные активные частицы, благодаря высокой поверхностной энергии, впадают в межкристаллизационные и внутрикристаллизационные поры, что приводит к возрастанию адгезионной прочности между частицами, плотности геля, снижая усадочные деформации и склонность к микродефектам и трещинам. Микрочастицы активного порошка практически

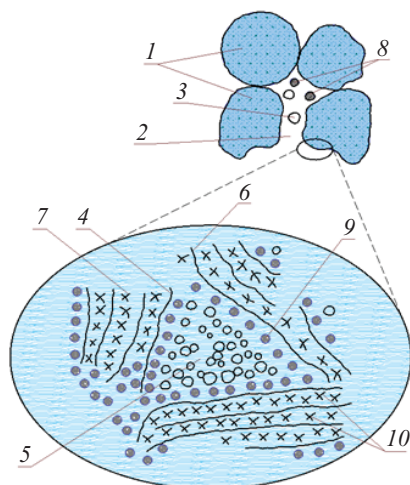


Рис. 5. Модель межфазового геля C–S–H с использованием тонкодисперсных активных порошков: 1 — участок (область) геля; 2, 4 — плотный контакт; 3 — поры между частицами; 5 — внутрикристаллизационные поры; 6 — водная прослойка; 7 — междукристаллизационная пора; 8–10 — активные частицы тонкодисперсного порошка размерами $(2\text{--}200) \cdot 10^{-9}$ м

Fig. 5. Model of C–S–H interphase gel using fine dispersed active powders: 1 — gel phase; 2, 4 — tight contact; 3 — pores between particles; 5 — intracrystallization pores; 6 — water layer; 7 — intercrystallization pore; 8–10 — active particles of fine powder with dimensions $(2\text{--}200) \cdot 10^{-9}$ m

полностью химически реагируют с клинкерными минералами с образованием труднорастворимых соединений типа C–S–H (I), C–A–H, C–F–H.

Проведенный анализ результатов исследований по разработке многокомпонентных вяжущих систем «портландцемент – минеральный порошок» подтвердил эффективность данного направления, существующие теоретические и практические основы формирования структуры и свойств наполненных композиций позволят с успехом осуществить их промышленное внедрение.

Для экспериментального закрепления приведенного анализа предлагаются результаты исследования вяжущих связок с использованием МД, приготовленных механоактивацией горных пород и бетонного производственного брака. Установлена зависимость изменения удельной поверхности минеральных порошков (при помощи прибора ПСХ–12) от продолжительности активации (табл. 1).

Наибольшей размолоспособностью характеризуется осадочная порода — опока, удельная поверхность которой составила $10\,500\text{ см}^2/\text{г}$ через 60 мин измельчения. Химический состав опоки в % по массе: $\text{MgO} = 1,10$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,47$; $\text{SiO}_2 = 28,7$; $\text{Na}_2\text{O} = 1,09$; $\text{CaO} = 61,53$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,12$. Сравнительно невысокое содержание кварца содействовало процессу измельчения. Немного меньшие показатели удельной поверхности зафиксированы у порошков из бетонного брака, объяснение этому сопоставимое увеличение на 18 % кварца в содержании добавки. Химический состав бетонного брака в % по массе: $\text{MgO} = 0,11$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,21$; $\text{SiO}_2 = 40,5$; $\text{Na}_2\text{O} = 0,19$; $\text{CaO} = 52,6$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2,39$.

Вулканический пепел и кварцевые пески труднее подвержены размолу, что обосновано соответствующим химико-минеральным составом, с преобладанием кварца. Химический состав вулканического пепла в % по массе: $\text{MgO} = 0,20$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13,57$; $\text{SiO}_2 = 73,67$; $\text{K}_2\text{O} = 6,00$; $\text{CaO} = 1,79$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,52$; $\text{TiO}_2 = 2,85$; ппп = 0,40. Химический состав зерен кварцевого песка в % по массе: $\text{MgO} = 6,32$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14,99$; $\text{SiO}_2 = 73,83$; $\text{K}_2\text{O} = 1,83$; $\text{CaO} = 0,60$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,97$; $\text{SO}_3 = 0,14$; $\text{TiO}_2 = 1,32$. Удельная поверхность полученных порошков изменялась в диапазоне $6500\text{--}7700\text{ см}^2/\text{г}$ через 1 ч помола в вибромельнице. Наибольший интерес представляют порошки из производственного бетонного брака, это связано с реализацией клинкерного фонда, законсервированного в плотной оболочке и требующего механического вмешательства.

Далее из приготовленных минеральных порошков были изготовлены и исследованы на 28 суток образцы цементно-песчаного состава (вяжущее:заполнитель = 1:3) с использованием стандартного Вольского монофракционного песка. Рецептура вяжущей связки «портландцемент – минеральный порошок» изменялась в зависимости от вида наполнителя, степень наполнения оставалась постоянной 25 %, удельная поверхность тонкодисперсной добавки соответствовала 60-минутному тонкому

Табл. 1. Удельная поверхность минеральной добавки

Table 1. Specific surface area of mineral additive

Наименование добавки Name additives	Удельная поверхность порошков, см²/г, от продолжительности механоактивации, мин Specific surface area of powders, cm²/gr, From duration of mechanoactivation, min			
	20	30	40	60
Кварцевый песок Quartz sand	3300	4200	5300	7400
Вулканический пепел Volcanic ash	3550	4250	5400	7900
Бетонный брак Defective concrete	4300	6300	8000	9800
Опока Flask	4800	6000	8300	10 500

измельчению. Анализ полученных результатов, представленных в табл. 2, показал, что МД из механоактивированного бетонного брака способствовала увеличению прочности ЦК на 20–24 % в сравнении с бездобавочной системой, и все это благодаря присутствию дополнительной активной составляющей в массиве добавки. А наличие доли известкового заполнителя в дисперсном состоянии способствует образованию таких труднорастворимых соединений, как гидрокарбосиликаты $4\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot m\text{CO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ и гидрокарбоалюминаты $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{CO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ кальция [14, 15, 17].

Минеральные тонкодисперсные добавки из вулканического пепла, опоки и кварцевого песка также проявили себя положительно, так как при экономии 25 % дорогого и ресурсоемкого ПЦ потери по прочности не наблюдались.

Для более детального исследования природы минеральных порошков добавку из бетонного брака, как самую эффективную, исследовали на дифрактометре ARL X'TRA, использующем кинематическую схему Θ - Θ с горизонтальным расположением плоского образца. Применено характеристическое излу-

Табл. 2. Свойства многокомпонентных вяжущих материалов

Table 2. Properties of multicomponent binders

Наименование добавки Name additives	Нормальная плотность, % Normal density, %	Удельная поверхность, см²/г Specific surface, cm²/g	Истинная плотность, кг/м³ True density, kg/m³	Водоотделение, % Water separation, %	Активность, МПа Activity, MPa
Кварцевый песок Quartz sand	26,0	3600	2970	18,0	53,4
Вулканический пепел Volcanic ash	27,5	4100	2980	16,7	54,7
Бетонный брак Defective concrete	27,6	5900	3010	15,0	62,6
Опока Flask	28,5	6200	2965	17,6	52,1
—	25,0	3370	3100	18,0	52,0

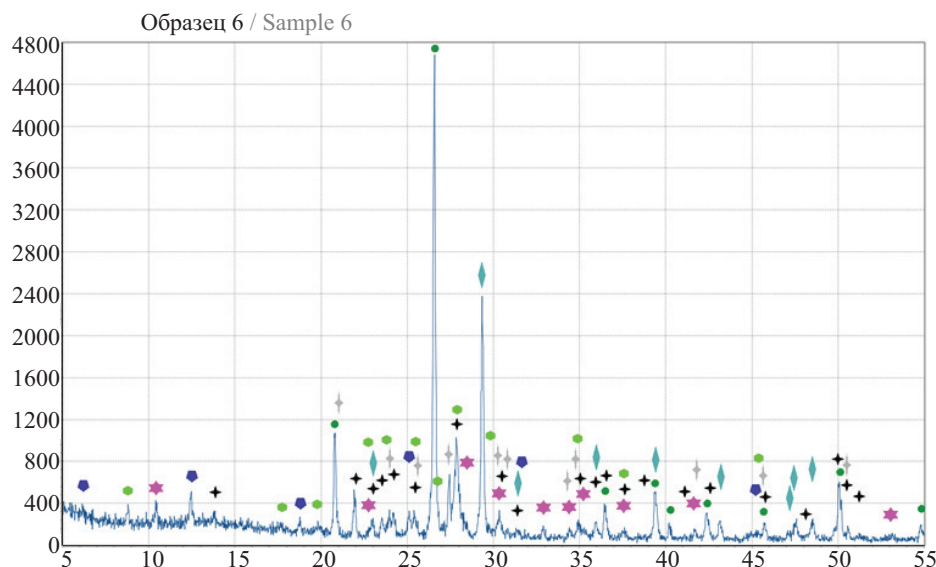


Рис. 6. Дифрактограмма образца бетонного брака в сопоставлении с данными базы PDF-2. Приведенные фазы сравнения: ● — кварц; ◆ — хлоритизированные темноцветные силикаты; ■ — белит C_2S ; ✕ — плагиоклаз (альбит — олигоклаз); ▲ — микроклин; ◆ — кальцит; ★ — амфибол

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of defective concrete sample according to PDF-2 database data. Given comparison phases: ● — quartz; ◆ — chloritized dark-colored silicates; ■ — belite C_2S ; ✕ — plagioclase (albite-oligoclase); ▲ — microcline; ◆ — calcite; ★ — amphibole

чение медного анода (длины волн $CuK\alpha_1$ 1,5406 Å, $CuK\alpha_2$ 1,5444 Å) (рис. 6).

Фазовый анализ выполнен с помощью базы порошковых дифракционных данных PDF-2, выпуск 2006. По результатам рентгенофазового анализа в образце бетонного брака установлено присутствие кальцита, кварца, белита C_2S , хлоритизированных темноцветных силикатов кальция, альбита. Наиболее яркие рефлексы принадлежат окристаллизированным кристаллам двухкальциевого силиката, микроклина и плагиоклаза. Присутствие силикатов кальция подтверждает эффективность добавки из бетонных остатков, являющихся дополнительным источником образования гидратированных силикатов кальция. За счет наличия определенной доли непрореагировавших клинкерных минералов происходит усиление контактной зоны в системе «портландцемент — минеральный порошок», что способствует повышению прочности и долговечности ЦК.

Топологическая модель контактной зоны вяжущей системы «портландцемент — порошок бетонного брака», наполненной тонкодисперсным активным материалом с удельной поверхностью 8000–10 000 cm^2/g , соответствует типу межфазового геля из низкоосновных гидросиликатов кальция C–S–H (рис. 5), гарантирующего значительный запас физико-механических показателей. К тому же, учитывая природу этой минеральной добавки, можно утверждать, что решаются проблемы экономического и экологического характера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка рецептур многокомпонентных вяжущих композиций с использованием тонкодисперсных МД различной природы «клинкер — минеральная добавка», «портландцемент — минеральная добавка», «клинкер — минеральная добавка — пластификатор» позволит расширить ассортимент линейки вяжущих, найти экономное практическое применение ресурсоемкому материалу, снизить расход энергозатрат на высокотемпературную обработку, и все это не в ущерб эксплуатационным показателям.

В работе представлены топологические модели диффузионной межфазовой зоны ЦК, состоящей из прореагировавшей клинкерной и минеральных составляющих; пограничных слоев, отличающихся составом новообразований гидратных силикатов кальция. Качественный состав пограничной межфазовой зоны определяется природой и реакционной способностью наполнителя. Использование минеральных порошков в вяжущей связке в комплексе приводит к увеличению активности ЦК на 12–20 % в зависимости от природы добавки.

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно констатировать, что соответствующий химико-минералогический состав, наличие ионообменных центров и высокий коэффициент активности способствуют повышению реакционной способности минеральных добавок, что важно для создания прочной вяжущей наполненной связки, необходимой для организации монолитного высотного строительства с конструктивными элементами сложной герметической конфигурации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самченко С.В., Воронин В.В., Ларсен О.А., Наруть В.В. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2 (746). С. 71–78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78 EDN EYNTLL.
2. Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю., Нахаев М.Р. Возможные пути альтернативного решения проблем в цементной индустрии // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 73–77. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77 EDN MWMPHT.
3. Ларсен О.А., Наруть В.В., Воронин В.В. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin- Based Geopolymer // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2020. № 2 (88). С. 61.
4. Лам Н.З.Т., Самченко С.В., Лам Т.В., Щецова В.А. Оптимизация пропорций композиционного вяжущего с комплексными добавками // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 427–437. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437
5. Самченко С.В., Егоров Е.С., Абрамов М.А. Особенности повторного использования цементных суспензий при реализации технологии рециклинга бетонных смесей // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 12. С. 1573–1581. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581
6. Коротких Д.Н., Паникин Д.А., Погорелова Ю.В. Самоуплотняющиеся бетоны на основе отходов камнедробления // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2017. № 5. С. 51–59. EDN ZTMVXJ.
7. Александрова О.В., Булгаков Б.И., Федосов С.В., Нгуен Д.В.К., Ляпидевская О.Б. Применение белого кварцевого песка для получения бетонов высокой прочности // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 19–25. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-19-25 EDN KHLHMS.
8. Баженова С.И. Высококачественные бетоны на наномодификаторах техногенного происхождения // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 172. EDN OWCDNZ.
9. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Эффективность модификаторов в регулировании свойств бетонных смесей // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 49–51. EDN ZCSKXB.
10. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite // Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Issue 11. Pp. 2084–2090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052
11. Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V., Kouznetsova T.V. Chemistry composition and properties of sulfated cements // SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). 2018. DOI: 10.14359/51711009
12. Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Murtazaev S-A.Yu., Bisultanov R.G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.98
13. Bataev D.K-S., Salamanova M.Sh., Murtazaev S-A.Yu., Viskhanov S.S., Murtazaev S-A.Yu. Utilization of cement kiln dust in production of alkali-activated clinker-free Binders // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.89
14. Саламанова М.Ш. Строительные композиты на основе бесклнкерных вяжущих щелочной активации. Грозный, 2021. 198 с. EDN TEXCJI.
15. Potapova E., Krivoborodov Yu., Samchenko S., Kouznetsova T. Effective ecological building materials based on activated ash-cement mixtures // SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings. 2018. DOI: 10.5593/sgem2018/6.3/s26.018
16. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Баранова А.А. Высокопрочный мелкозернистый бетон с мультикомпонентным наноимпрегнатом алюмосиликатного состава // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 9. С. 6–14. DOI: 10.12737/article_5bab4a1716b568.75074339 EDN YLEPVZ.
17. Корнеев В.И., Павлов А.И., Сорочкин М.А. Исследование начальной стадии гидратации многокомпонентных цементов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 1988. № 8. С. 81–84.
18. Takemoto K., Uchikawa H., Ogawa K. Mechanism of the hydration in the system pozzolana — C_3S // VII International Congression the Chemistry of Cement. Paris, 1980. Vol. 111. Pp. 242–247.
19. Бурьянов А.Ф., Гальцева Н.А., Будыжова Е.Н., Фишер Х.Б. Вопросы теории и практики применения гипсовых и ангидритовых вяжущих // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: сб. науч. тр. РААСН. М., 2022. С. 58–65. EDN OVEGSP.
20. Свейти Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф., Петропавловская В.Б. Дисперсно-армированные гипсовые композиции // Химия, физика и механика материалов. 2022. № 2 (33). С. 32–45. EDN BRNIAY.

Поступила в редакцию 14 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 22 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 7 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мадина Шахидовна Саламанова** — доктор технических наук, доцент, директор Научно-технического центра коллективного пользования «Современные строительные материалы и технологии»; **Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова)**; 364051, г. Грозный, Чеченская Республика, пр-т Хусейна Исаева, д. 100; **Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук**; 364051, г. Грозный, ул. В. Алиева, д. 21 а; SPIN-код: 614-9180, Scopus: 57192895779, ResearcherID: ABF-7578-2020, ORCID: 0000-0002-1293-7090; madina_salamanova@mail.ru;

Магомед Рамзанович Нахаев — кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерных технологий; **Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова**; 364024, г. Грозный, ул. Шерипова, д. 32; SPIN-код: 1098-5356, Scopus: 57192895989, ResearcherID: F-1101-2017, ORCID: 0000-0002-2589-6662; mr-nakhaev@mail.ru.

Вклад авторов:

Саламанова М.Ш. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Нахаев М.Р. — научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Samchenko S.V., Voronin V.V., Larsen O.A., Naruts V.V. Self-compacting concrete with compensated shrinkage based on recycled concrete materials. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; 2(746):71-78. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78 EDN EYNTLL. (rus.).
2. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Nakhaev M.R. Possible alternative solutions to problems in the cement industry. *Construction Materials*. 2020; 1-2:73-77. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-73-77 EDN MWMPHT. (rus.).
3. Larsen O.A., Narut V.V., Voronin V.V. Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2020; 2(88):61. (rus.).
4. Lam N.D.T., Samchenko S.V., Lam T.V., Shvetsova V.A. Optimization of proportions of a composite binder that has multi-component additives. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(3):427-437. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.427-437 (rus.).
5. Samchenko S.V., Egorov E.S., Abramov M.A. Features of using cement suspension in concrete mixture recycling technology. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(12):1573-1581. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581 (rus.).
6. Korotkikh D.N., Panikin D.A., Pogorelova Yu.V. Self-compacting concretes based on stone crushing waste. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2017; 5:51-59. EDN ZTMVXJ. (rus.).
7. Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I., Fedosov S.V., Nguyen Duc Vinh Quang, Lyapidevskaya O.B. Use of white quartz sand for high-strength concrete. *Construction Materials*. 2022; 11:19-25. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-19-25 EDN KHLHMS. (rus.).
8. Bazhenova S.I. High-quality concrete on nanomodifiers technogenic origin. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2011; 3-2:172. EDN OWCDNZ. (rus.).
9. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznetsova T.V. Efficiency of modifiers when regulating properties of concrete mixes. *Construction Materials*. 2017; 7:49-51. EDN ZCSKXB. (rus.).
10. Villa C., Pecina E.T., Torres R., Gomez L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*. 2010; 24(11):2084-2090. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052
11. Krivoborodov Y.R., Samchenko S.V., Kouznetsova T.V. Chemistry composition and properties of sulfated cements. *SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018)*. 2018. DOI: 10.14359/51711009
12. Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Bisultanov R.G. Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.98
13. Bataev D.K.-S., Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu., Viskhanov S.S., Murtazaev S.-A.Yu. Utilization of cement kiln dust in production of alkali-activated clinker-free binders. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.89

14. Salamanova M.Sh. *Building composites based on clinker-free binders of alkaline activation*. Grozny, 2021; 198. EDN TEXCJI. (rus.).
15. Potapova E., Krivoborodov Yu., Samchenko S., Kouznetsova T. Effective ecological building materials based on activated ash-cement mixtures. *SGEM International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference EXPO Proceedings*. 2018. DOI: 10.5593/sgem2018/6.3/s26.018
16. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Baranova A.A. High-strength grained concrete with multi-component nano-impregnated aluminosilicate composition. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 9:6-14. DOI: 10.12737/article_5bab4a1716b568.75074339 EDN YLEPVZ. (rus.).
17. Korneev V.I., Pavlov A.I., Sorochkin M.A. Study of the initial stage of hydration of multicomponent cements. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology*. 1988; 8:81-84. (rus.).
18. Takemoto K., Uchikawa H., Ogawa K. Mechanism of the hydration in the system pozzolana — C_3S . *VII International Congress the Chemistry of Cement*. Paris, 1980; 111:242-247.
19. Buryanov A.F., Gal'tseva N.A., Buldyzhova E.N., Fisher Kh.-B. Issues of theory and practice of application of gypsum and anhydrite binders. *Fundamental, search and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021 : collection of scientific papers RAASN*. Moscow, 2022; 58-65. EDN OVEGSP. (rus.).
20. Sweity Y., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F., Petropavlovskaya V.B. Dispersive-reinforced gypsum compositions. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2022; 2(33):32-45. EDN BRNIAY. (rus.).

Received February 14, 2023.

Adopted in revised form on May 22, 2023.

Approved for publication on July 7, 2023.

B I O N O T E S : **Madina Sh. Salamanova** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Technical Center for Collective Use “Modern Building Materials and Technologies”; **Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov (GSOTU named after academician M.D. Millionshchikov)**; 100 Isaev avenue, Grozny, 364051, Russian Federation; **Complex Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences**; 21 a Alieva st., Grozny, 364051, Russian Federation; SPIN-code: 614-9180, Scopus: 57192895779, ResearcherID: ABF-7578-2020, ORCID: 0000-0002-1293-7090; madina_salamanova@mail.ru;

Magomed R. Nakhaev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Technologies, **Chechen State University named after A.A. Kadyrov**; 32 Sheripova st., Grozny, 364024, Russian Federation; SPIN-code: 1098-5356, Scopus: 57192895989, ResearcherID: F-1101-2017, ORCID: 0000-0002-2589-6662; mr-nakhaev@mail.ru.

Contribution of the authors:

Madina Sh. Salamanova — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Magomed R. Nakhaev — scientific editing.

The authors declare no conflict of interest.