

УДК 691.54

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА

Копаница Наталья Олеговна¹,
kopanitsa@mail.ru

Демьяненко Ольга Викторовна¹,
demyanenko.olga.v@gmail.com

Куликова Анжелика Андреевна¹,
lika.panda.19@gmail.com

Ткач Евгения Владимировна²,
ev_tkach@mail.ru

Шестаков Николай Игоревич²,
nik.shestakov.1990@mail.ru

Степина Ирина Васильевна²,
stepinaiv@mgsu.ru

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

² Московский государственный строительный университет,
Россия, 129337, г. Москва, Ярославское ш., 26.

Актуальность исследования обусловлена важностью проблемы рационального использования природных ресурсов в производстве композиционных строительных материалов. Возможность частичной замены природного невозобновляемого сырья, используемого в производстве многотонажных бетонных и растворных смесей на основе цемента, вторичными продуктами производства различных отраслей позволит решить проблемы: ресурсосбережения, энергопотребления и экологии. Строительная отрасль является крупнейшим потребителем побочных продуктов горнодобывающих предприятий: вскрышных пород и отходов горно-обогатительных предприятий, а это сотни миллионов тонн в год. Наиболее изученными являются вопросы, связанные с применением их в качестве мелкого и крупного заполнителя в бетонных и растворных смесях различного назначения. Расширение возможности применения в производстве композиционных строительных материалов вторичных продуктов производства горнодобывающих предприятий связано с получением на их основе активных минеральных добавок, наполнителей в бетонные и растворные смеси, а также энергетически активных наномодификаторов. Применение побочных продуктов различного химического состава и дисперсности позволяет направленно регулировать процессы структурообразования и твердения композиционных материалов на основе цемента и получать композиционные материалы с требуемыми эксплуатационными свойствами

Цель: научно обосновать и исследовать возможность применения отходов горнодобывающих предприятий в качестве компонентов в бетонные и растворные смеси на основе цемента.

Объекты: модифицирующие добавки на основе вторичных продуктов; композиционные материалы с повышенными эксплуатационными свойствами.

Методы: определение нормальной плотности, сроков твердения, прочности при изгибе и при сжатии по ГОСТ; термический анализ; электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, колориметрия.

Результаты. Представлены результаты исследований, необходимых для научного обоснования, разработки и внедрения в строительную отрасль технологии производства строительных растворных смесей, полученных с использованием вторичных продуктов горнодобывающих предприятий. Представлены сравнительные результаты исследований по влиянию комплексной добавки микрокальцита и нано-SiO₂ на свойства цементных систем. Показано, что введение комплексной добавки повышает прочность на сжатие цементного камня, позволяет сократить расход цемента без снижения его нормативных характеристик и повысить эксплуатационные свойства бетона.

Ключевые слова:

Вязущее, цементные композиции, микрокальцит, наномодифицирующие добавки, вторичные продукты производства.

Введение

Повышение негативного влияния промышленных объектов на окружающую среду сопровождается истощением природных ресурсов и нарушением динамического равновесия биосферы. В этой связи особую актуальность приобретает концепция устойчивого развития регионов, в основе которой – разработка природоохранных и ресурсосберегающих технологий

строительных материалов. Поэтому научное и экспериментальное обоснование возможностей рационального использования вторичных продуктов различного химического состава и структуры в производстве строительных материалов является актуальной задачей. Наиболее значимыми для развития строительной отрасли являются бетонные и растворные смеси на основе цементного вяжущего. Стратегией ресурсного

обеспечения строительного комплекса России до 2030 г. предусматривается развитие инновационных технологий производства цементных бетонов с высокими показателями физико-механических свойств. Для повышения качества и востребованности готового продукта необходимы новые знания о процессах структурообразования в цементном камне на макро- и микроуровне с участием полифункциональных химически активных добавок и микронаполнителей. Для решения этих задач необходимо научно обосновать выбор компонентов композиционных материалов, разработать многоуровневые полифункциональные добавки, включающие нанообъекты и техногенные продукты и исследовать их влияние на свойства композиционных строительных материалов [1, 2].

Проблеме повышения эксплуатационных характеристик бетонов и растворов с применением различных модифицирующих и наномодифицирующих добавок посвящены труды многих отечественных и зарубежных исследователей. В их работах [3–13] отмечаются преимущества мелкозернистой структуры затвердевшего бетона и возможность регулирования в широком интервале его свойств, в том числе и различными по составу и свойствам модифицирующими добавками. Эффективность применения в бетонах и растворах тонкодисперсных минеральных наполнителей (зола, тонкомолотые шлаки, микрокремнезем, карбонатная мука и др.), с целью улучшения их свойств, не вызывает сомнений. При этом вопросы по механизму взаимодействия компонентов бетонной смеси с модифицирующими добавками, закономерностям формирования плотной структуры цементного камня и композиционного камня с добавками высокой степени дисперсности, в том числе и наноразмерных компонентов, остаются недостаточно изученными. Цементный бетон является основным строительным материалом XXI в., его потребление в мире неуклонно растет, одним из важных факторов непереходящего интереса к этому материалу является: минимальная энергоемкость и наибольшие возможности утилизации вторичных материальных ресурсов: крупнотоннажных отходов промышленности, теплоэнергетики, строительства, а также способности к вторичной переработке. При этом хотя технологии производства бетонов и растворов постоянно совершенствуются, производство портландцемента как основного компонента бетонных и растворных смесей по-прежнему не отвечает современным экологическим вызовам, связанным со значительным объемом выбросов CO_2 при его производстве, что требует эффективных решений. Большая часть выбросов углекислого газа (около 60 %) образуется в результате химического разложения карбоната кальция, входящего в состав минералов портландцементного клинкера. Объемы выбросов могут быть уменьшены за счет снижения содержания клинкера в цементе, а также с помощью альтернативных методов производства цемента, таких как использование тонкодисперсных добавок на основе вторичного сырья промышленного производства и переработки горных пород: шлаков, зол, микрокремнезема, карбонатной му-

ки. Присутствие в строительной смеси эффективных модифицирующих добавок может обеспечить снижение расхода цемента на 1 м^3 растворной или бетонной смеси до 15–30 % [14, 15].

В последние годы учеными проводятся исследования в области получения и применения ультрадисперсных материалов в составах бетонных смесей различного назначения. В связи со сложившейся экономической ситуацией российский рынок строительных материалов на сегодняшний день должен ориентироваться на импортозамещение. Эффективное использование местного доступного сырья и вторичных продуктов для производства новых строительных материалов или получения модифицирующих добавок является актуальной проблемой для всех регионов России. Результаты исследований, как российских, так и зарубежных ученых, показывают эффективность использования местных материалов и побочных продуктов в качестве компонентов бетонных и растворных смесей не только с точки зрения снижения затрат на транспортные расходы, но и улучшения строительно-технических характеристик продукции [16–19].

Вместе с тем в состав многих добавок, разрабатываемых на основе вторичного сырья, входят химические соединения, традиционно не используемые в строительстве, механизмы, действия которых на процессы гидратации и твердения цементных и смешанных систем исследованы недостаточно. Поэтому для получения эффективных модифицирующих добавок с использованием вторичного сырья необходима разработка технологий их подготовки, переработки, а также исследования процессов гидратации, твердения цементных вяжущих, обеспечивающих формирование прочностных свойств и долговечности композиционных материалов. Опыт применения полифункциональных модифицирующих добавок в бетонные смеси показывает, что комплексные добавки более эффективны с точки зрения технологии и экономики, чем однокомпонентные добавки, которые, наряду с улучшением каких-либо свойств бетона или бетонной смеси, могут ухудшить или существенно снизить другие технологические показатели. Применение таких добавок позволяет регулировать процессы гидратации цемента, структуру цементного камня и бетона, замедлять его старение и повышать долговечность, что обеспечит высокие эксплуатационные характеристики бетонных изделий и конструкций.

Анализ литературных данных, посвященных данным проблемам, показывает, что большое количество местного сырья и вторичных ресурсов различных отраслей промышленности в большинстве регионов страны используется недостаточно [10, 11, 20].

Таким образом, исследование возможности использования вторичного сырья различных отраслей промышленности в качестве сырьевой базы для получения модифицирующих добавок, наполнителей и вяжущих материалов на сегодняшний день является актуальным, поскольку позволяет комплексно решать проблему повышения эффективности и качества строительного производ-

ства и снижать экологический ущерб окружающей среде. Полученные результаты исследований, представленные в работах [15, 21, 22], позволили установить возможность рационального использования карбонатных отходов (микрокальцита) горнодобывающих предприятий как эффективную добавку в цементные композиции, что позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу и внести вклад в решение экологических проблем. Сравнительные результаты исследований по влиянию добавки микрокальцита разных месторождений на свойства цементных систем показывают, что введение добавки микрокальцита (МСа) при ее оптимальном значении обеспечивает существенное повышение предела прочности при изгибе и сжатии цементного камня и строительного раствора. Эффективность влияния добавки микрокальцита на свойства цементных композиций зависит от его минералогического состава и величины удельной поверхности. Введение добавки микрокальцита способствует появлению дополнительных центров кристаллизации при твердении цементного теста, образованию дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция, уплотняет структуру цементного камня и строительной смеси.

Применение микрокальцита в технологии производства строительных смесей в качестве наполнителя известно и достаточно изучено [20, 23]. CaCO_3 обладает низкой растворимостью, не образует кристаллогидратов, химически не взаимодействует с водой, и содержит катионы, входящие в состав большинства клинкерных минералов. В строительных композитах и бетонах наполнители играют активную структурообразующую роль, тесно связанную с механизмом их контактных и адгезионных свойств. Важной особенностью микрокальцита является его химическое сродство с продуктами гидратации цементного камня. Причиной химической активности карбонатных пород является образование в системе «карбонат–цемент» гидрокарбосиликата кальция, гидрокарбоната кальция – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

В работах [24–26] показано, что добавка в цементное вяжущее нано- SiO_2 (размер частиц до 40 нм) в количестве 0,03 % от массы цемента повышает прочность при сжатии цементного камня до 32 % по сравнению с контрольными образцами, что связано с образованием дополнительного количества высокопрочных низкоосновных гидросиликатов кальция и увеличением центров кристаллизации на первичной стадии гидратации цемента, а также является инициатором формирования структуры и прочностных свойств в системе «нано- SiO_2 – микродисперсный компонент – цемент». Предполагается, что тонкодисперсный порошок МСа совместно с нано- SiO_2 обеспечивает более полное связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при твердении портландцемента, формируя дополнительные центры кристаллизации.

Исследования в данной работе проводились с целью разработки эффективных составов строительных смесей с повышенными эксплуатационными свойствами при использовании вторичных продуктов производства.

Материалы и методы

Для проведения исследований использовались следующие материалы.

Вяжущее: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Топкинского цементного завода. Характеристики вяжущего удовлетворяют требованиям ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия».

Модифицирующие добавки:

- микрокальцит (МСа), многотоннажный отход, образующийся при дроблении мрамора МК-5 по ТУ 5743-002-671431849-2015 на Ново-Ивановском карьере вблизи г. Полевского, ООО «Эверест». Характеристики по минералогическому составу и свойствам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Минералогический состав и физические свойства микрокальцита

Table 1. Mineralogical composition and physical properties of microcalcite

Состав и свойства/Composition and properties	Показатели/Indices
CaCO_3 , %	97–99
$\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$, %	не более 0,3 no more than 0,3
SiO_2 , %	не более 0,2 no more than 0,2
SO_3 , %	–
FeS_2 , %	не более 0,1 no more than 0,1
Полевые шпаты/Feldspars, %	–
Гидроокислы железа/Iron hydroxides, %	
Глинистые/Clayey	
Массовая доля летучих веществ, % Mass fraction of volatile substances, %	не более 0,3 no more than 0,3
Массовая доля веществ растворимых в воде, % Mass fraction of substances soluble in water, %	
Плотность (ISO 787/10), kg/m^3 Density (ISO 787/10), kg/m^3	2740
Удельная поверхность, m^2/kg Specific surface area, m^2/kg	250

- наноразмерный диоксид кремния (нано- SiO_2), получен плазменно-дуговым методом, разработанным в ТГАСУ [27], в качестве сырья использовался диатомит (вскрышная порода). Наночастицы полученного порошка имеют распределение по размерам в диапазоне от 10 до 300 нм. Удельная поверхность нано- SiO_2 составляет $40000 \text{ m}^2/\text{kg}$.

На рис. 1 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).

Заполнитель: в качестве заполнителя использовался песок Виллинского месторождения Томского района с модулем крупности $M_k=1,8$, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ».

Для оценки влияния комплексной добавки микрокальцита и нано- SiO_2 на свойства цементного камня готовились образцы-кубики $20 \times 20 \times 20$ мм из цементного теста нормальной густоты, которые хранились в нормальных условиях ($T=20 \pm 2$ °C, $W=90-100$ %) и испытывались на прочность в 28 суточном возрасте (ГОСТ 30744-2001).

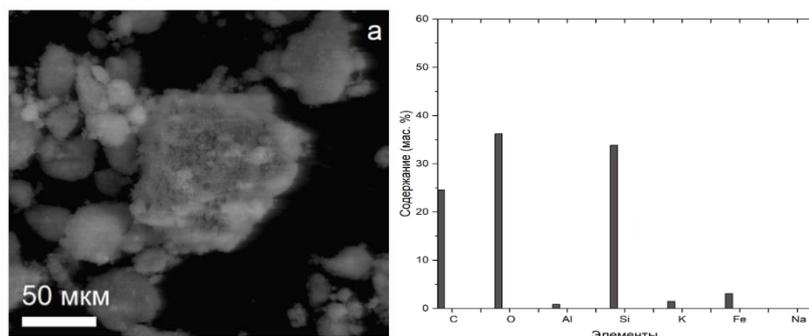


Рис. 1. СЭМ nano-SiO₂ и энергодисперсионной анализ рентгеновской спектроскопии

Fig. 1. Scanning electron microscopy of nano-SiO₂ and energy-dispersive analysis of X-ray spectroscopy

Для изучения влияния комплексной добавки на свойства цементно-песчаного раствора формовались образцы-балочки 40×40×160 мм, контрольный и модифицированный. Образцы хранились в нормальных условиях (T=20±2 °C, W=90–100 %) и испытывались на изгиб и на сжатие в 7 и 28 сутокном возрасте.

Обсуждение результатов

Для оценки совместного влияния комплексной модифицирующей добавки на физико-механические свойства цементного камня были изготовлены образцы при равном соотношении цемента с различным содержанием микрокальцита – 2,5; 5; 7,5, 10 % от массы цемента и наномодификатора nano-SiO₂ в количестве 0,03 % от массы цемента (составы 2–5), в сравнении с контрольным составом 1.

В работе представлены также результаты исследований по возможности снижения расхода цемента в строительной смеси при введении предложенной комплексной добавки. Содержание портландцемента уменьшалось пропорционально количеству введенной комплексной добавки (2,5–10 %) – составы 6–9.

Для каждого состава готовились не менее 20 образцов. Значение прочности определялось как среднеарифметическое значение из 5 образцов на каждый срок твердения, коэффициент вариации не более 5 %. Составы исследуемых образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Составы исследуемых образцов

Table 2. Compositions of the studied samples

№ состава Composition no.	ПЦ Portland cement, %	МСа, %	Нано-SiO ₂ , % Nano-SiO ₂ , %
1 Контрольный Control	100	–	–
2 Ц+МСа2,5 %	100	2,5	0,03
3 Ц+МСа5 %	100	5,0	0,03
4 Ц+МСа7,5 %	100	7,5	0,03
5 Ц+МСа10 %	100	10	0,03
6 Ц–МСа2,5 %	97,50	2,5	0,03
7 Ц–МСа5 %	94,97	5,0	0,03
8 Ц–МСа7,5 %	92,47	7,5	0,03
9 Ц–МСа10 %	89,97	10	0,03

При совместном действии МСа и nano-SiO₂ увеличение прочности при сжатии в возрасте 28 суток твердения у всех составов составляет от 30 до 51 % (табл. 3).

Состав 3 с добавкой, состоящей из МСа и nano-SiO₂, в соотношении 5 и 0,03 % соответственно, от

массы цемента, показывает наибольший рост значения прочности, которое составляет 51,3 % по сравнению с контрольным составом.

При замене цемента на количество введенной добавки также можно наблюдать рост прочности у всех составов. У состава 7 с содержанием МСа – 5 % и nano-SiO₂ – 0,03 %, увеличение прочности составляет 47,7 %, при этом снижается водопотребность.

Известно, что показатель водопотребности цементного теста в значительной степени зависит от минералогического состава вяжущего и от дисперсности компонентов цементной смеси. Исследования по определению нормальной плотности цементного вяжущего проводились по стандартной методике. С введением комплексной добавки, состоящей из МСа – 5 % и nano-SiO₂ – 0,03 %, и снижением расхода цемента на 5 % водопотребность уменьшается на 1 % (нормальная плотность 27,2 %). Снижение нормальной плотности может быть связано с адсорбцией добавки на гидратирующихся цементных зёрнах и уменьшением их слипания между собой при замене цемента 5 % МСа.

Таблица 3. Результаты исследования физико-механических характеристик составов

Table 3. Results of the study of the physical and mechanical characteristics of the compositions

№ состава Composition no.	Нормальная плотность Normal density	Сроки схватывания, мин Setting time, min		Прочность при сжатии в возрасте 28 суток твердения, МПа Compressive strength at the age of 28 days of curing, MPa
		Начало Start	Конец End	
1 Контрольный Control	27,5	180	240	68,1
2 Ц+МСа2,5	27,8	185	225	93,9
3 Ц+МСа5	28,2	160	220	103,1
4 Ц+МСа7,5	28,5	160	225	91,0
5 Ц+МСа10	28,7	160	225	87,2
6 Ц–МСа2,5	27,2	185	225	90,9
7 Ц–МСа5	27,2	160	210	100,6
8 Ц–МСа7,5	27,5	160	225	91,4
9 Ц–МСа10	27,7	150	220	87,35

Добавка также оказывает влияние на сроки схватывания цементного теста (табл. 3). Введение добавок позволяет сократить сроки схватывания цементного теста: начало схватывания – на 20 минут, конец схватывания – 25–30 минут.

Анализ представленных в табл. 3 результатов позволил выбрать рациональный состав вяжущего (№ 7) с заменой цемента добавкой микрокальцита 5 %, так как прирост прочности в возрасте 28 суток твердения составил 47,7 %, по сравнению с контрольным (со-

став 1) при сокращении расхода вяжущего и снижении нормальной густоты.

На рис. 2, 3 представлены термограммы контрольного и модифицированного цементного камня.

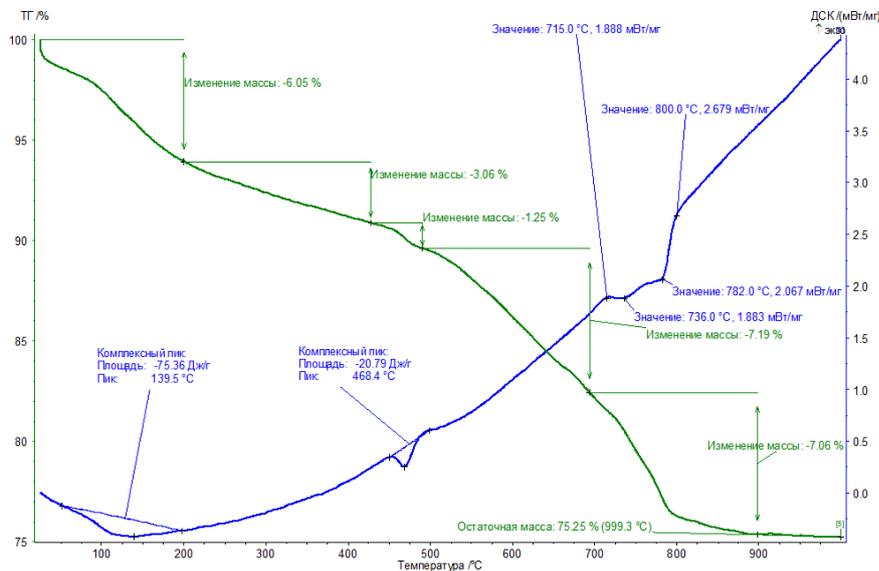


Рис. 2. Термограмма контрольного образца цементного камня

Fig. 2. Thermogram of a cement stone control sample

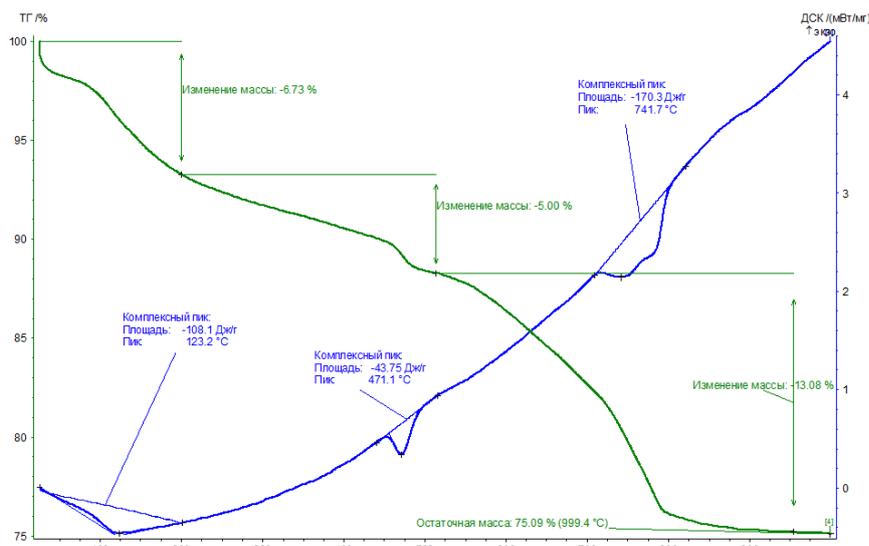


Рис. 3. Термограмма цементного камня с комплексной добавкой MCa 5 % и nano-SiO₂

Fig. 3. Thermogram of cement stone with a complex additive of MCa 5 % and nano-SiO₂

Методом ТГ и ДСК установлено, что на термограммах контрольного цементного камня и с комплексной добавкой эндоэффекты при температурах 468–471 °С, соответствующие диссоциации гидроксида кальция – портландита, а также дегидратации образующихся гидросиликатов кальция [28], существенно различаются по площади. На термограмме цементного камня с комплексной добавкой площадь пика в два раза больше, что может быть связано с наложением термоэффектов дегидратации дополнительно образовавшихся гидросиликатов при взаимодействии активной добавки nano-SiO₂.

На рис. 4 представлены рентгенограммы исследуемых образцов.

Сравнение рентгенограмм контрольного и модифицированного образцов подтверждает возможность образования новых кристаллических фаз в цементном камне в присутствии активных добавок. С введением комплексной добавки на основе нанодиоксида кремния и микрокальцита в гидратированном цементе идентифицируются дополнительные пики низкоосновных гидросиликатов кальция, сходных по структуре с афвиллитом C₃S₂H₃ (d/n=0,192 нм), и тоберморитоподобных соединений C₅S₆H₅ (d/n=0,302; 0,334;

0,261 нм), гидрокربосиликатов кальция ($d/n=0,168$ нм), что обеспечивает повышение прочности цементного камня. Интенсивность пиков $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d/n=0,262$ нм) в модифицированном цементном камне снижается по сравнению с контрольным образцом вследствие взаимодействия с модифицирующими добавками с обра-

зованием дополнительных количеств кристаллогидратов.

Для подтверждения полученных результатов влияния добавок на формирование структуры цементного камня проведен электронно-микроскопический анализ образцов (рис. 5, 6).

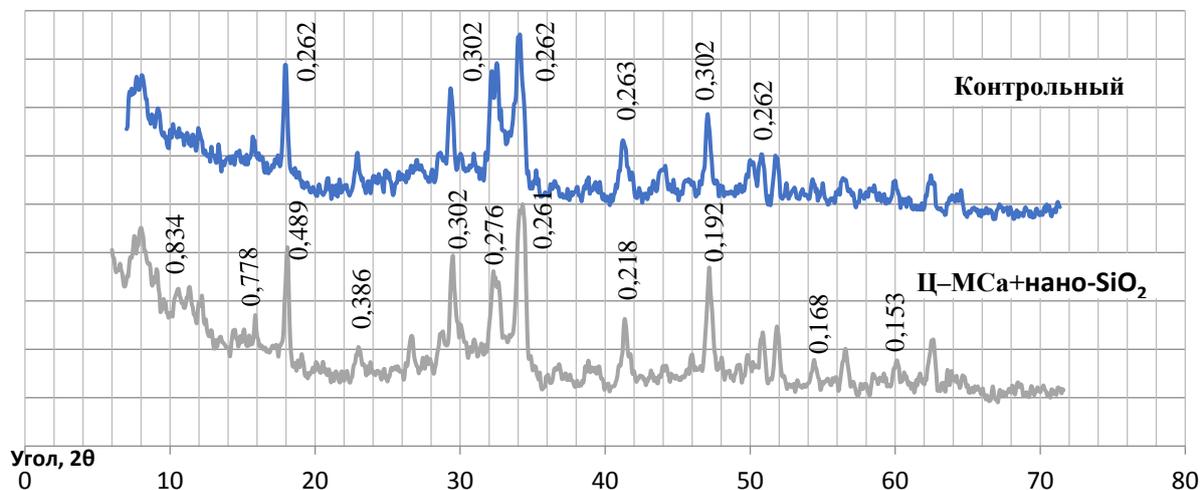


Рис. 4. Рентгенограмма цементного камня, контрольного и модифицированного добавкой МСа 5 % и нано-SiO₂
Fig. 4. Radiograph of cement stone, control and modified with MСa 5 % and nano-SiO₂

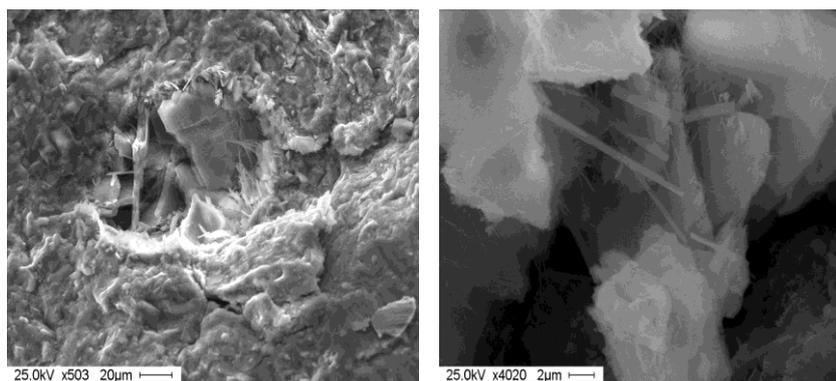


Рис. 5. Электронно-микроскопический снимок контрольного образца цементного камня
Fig. 5. Electron microscopic image of a cement stone control sample

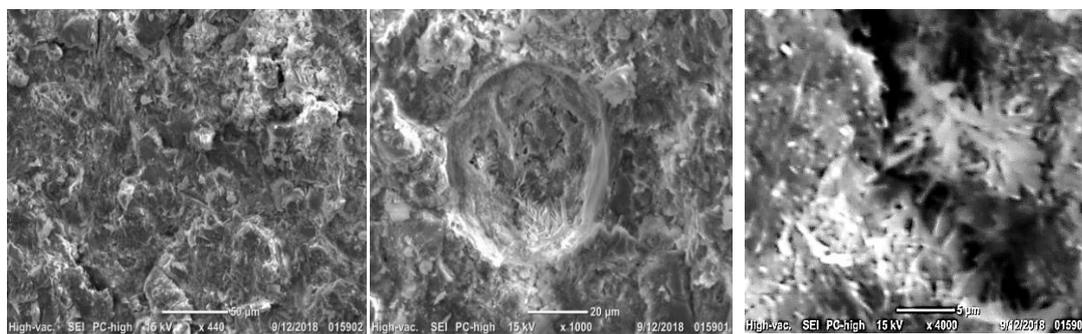


Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок цементного камня, модифицированного комплексной добавкой МСа 5 % и нано-SiO₂ на сколе образца и в поровом пространстве
Fig. 6. Electron microscopic image of a cement stone modified with a complex additive of MСa 5 % and nano-SiO₂ on a sample chip and in pore space

Анализ данных на снимках показывает, что введение комплексной добавки МСа 5 % нано-SiO₂ в цементную матрицу обеспечивает образование допол-

нительных количеств низкоосновных гидросиликатов кальция, стабильных высокоосновных гидросульфаталюминатов кальция с разросшейся игольчатой

структурой, затягивающей поры. Отмечается более плотная структура модифицированного цементного камня. В модифицированном цементном камне крупные пластинчатые кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ заменяются большим количеством гидросиликатов и гидрокарбосиликатов кальция, которые уплотняют и упрочняют структуру цементного камня.

Для определения тепловых эффектов при гидратации цемента были проведены исследования по установлению разницы между тепловыделением контрольного цемента и модифицированного вяжущего при постоянной температуре 20°C . График изменения теплового потока для исследуемых образцов представлен на рис. 7.

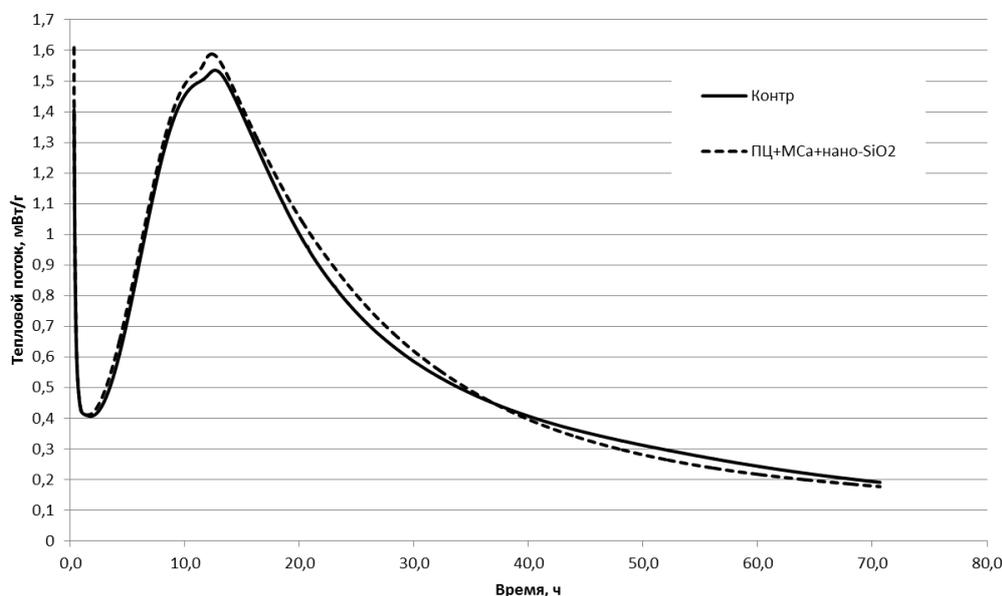


Рис. 7. Изменение теплового потока контрольного состава и состава, модифицированного комплексной добавкой МСа 5 % и нано- SiO_2

Fig. 7. Change in the heat flux of the control composition and the composition modified by the complex additive МСа 5 % and nano- SiO_2

Данные графика показывают, что тепловой поток развивался в соответствии с тремя этапами (резкий мгновенный пик вначале измерений следует исключить). На первом этапе выделяемое тепло незначительно (инкубационный период). За ним следует период ускорения, который указывает на образование новых гидратов. Период замедления является результатом диффузии воды и ионов через слои гидратов, толщина которых возрастает. При гидратации модифицированного цементного вяжущего на ранних стадиях тепловыделение выше, чем у контрольного состава. Это может быть связано с присутствием добавки нано- SiO_2 , которая активизирует процессы гидратации цементного вяжущего с зарождением низкоосновных гидросиликатов кальция.

В работе исследовались возможности применения модифицированного цемента в композиционном материале на примере растворных строительных смесей. Для установления рациональных составов цементно-песчаных растворов с комплексными модифицирующими добавками и получения сухих строительных смесей с заданными свойствами готовились цементно-песчаные растворы, контрольный и модифицированный, с нормальной консистенцией. Составы исследуемых цементно-песчаных растворов представлены в табл. 4.

Для установления влияния комплексных модифицирующих добавок на прочностные характеристики растворных смесей были проведены испытания це-

ментно-песчаных образцов-балочек на изгиб и на сжатие (рис. 8).

Таблица 4. Составы исследуемых цементно-песчаных растворов

Table 4. Compositions of the studied cement-sand mortars

№ состава Composition no.	ПЦ Portland cement	Песок Sand	МСа	Нано- SiO_2 Nano- SiO_2	В/Ц W/C
	%				
Контрольный Control	25	75	–	–	0,5
Модиф. 1 Modified 1	25	70	5	0,03	0,475
Модиф. 2 Modified 2	20	75	5	0,03	0,475

ВЦ – Водоцементное отношение; WC – water/cement ratio.

Из представленных диаграмм видно, что комплексная добавка повышает прочность цементного камня на всех сроках твердения (7, 28 суток), по сравнению с контрольным образцом. При введении комплексной добавки 5 % микрокальцита и 0,03 % нано- SiO_2 к 28 суткам твердения прочность цементного камня превышает прочность контрольного состава на изгиб на 70 %, на сжатие на 63 %. У состава 2, со снижением расхода цементного вяжущего на 5 %, к 28 суткам прирост прочности на изгиб составляет 40 %, на сжатие 36 % по сравнению с контрольным.

Таблица 5. Рецелтура ремонтной сухой строительной смеси

Table 5. Recipe for repair dry mortar

Материалы Materials	Расход на тонну, кг Consumption per ton, kg
Портландцемент Portland cement	243,75
Песок/Sand 0,63–1,25	45
Песок/Sand 0,315–0,63	303,75
Песок/Sand 0,16–0,315	401,25
Микрокальцит Microcalcite	12,25
Нано-SiO ₂ /Nano-SiO ₂	0,075
Всего/Total	1000,00

На основании проведённых исследований предложены составы сухих строительных смесей с разработанной комплексной добавкой (МСа 5 % и нано-SiO₂).

В табл. 7 представлены эксплуатационные свойства сухих строительных смесей предложенных со-

ставов по ГОСТ 31357-2013 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия».

Таблица 6. Рецелтура кладочной сухой строительной смеси

Table 6. Recipe for masonry dry mortar

Материалы Materials	Расход на тонну, кг Consumption per ton, kg
Портландцемент Portland cement	243,75
Песок/Sand 1,25–2,5	11,25
Песок/Sand 0,63–1,25	33,75
Песок/Sand 0,315–0,63	303,75
Песок/Sand 0,16–0,315	401,25
Микрокальцит Microcalcite	12,25
Нано-SiO ₂ /Nano-SiO ₂	0,075
Всего/Total	1000,00

Таблица 7. Основные эксплуатационные свойства растворов из предложенных сухих строительных смесей

Table 7. The main operational properties of solutions from the proposed dry building mixtures

Свойства сухих смесей Properties of dry mixes	Назначение сухих смесей/Appointment of dry mixes		Показатели по ГОСТ Indicators according to SS
	Кладочная/Masonry	Ремонтная/Repair	
Для сухой смеси/For dry mix			
Насыпная плотность, кг/м ³ Bulk density, kg/m ³	1348	1343	В зависимости от вида раствора Depending on the type of solution
Для растворной смеси/For mortar mix			
Подвижность, см Mobility, cm	Пк3/Рк3	Пк2/Рк2	В зависимости от назначения раствора Depending on the type of solution
Водоудерживающая способность, % Water holding capacity, %	98,2	97,8	Не менее 90 % At least 90 %
Жизнеспособность, ч/Viability, h	1,5	1,5	Не регламентируется/Not regulated
Для затвердевших растворов/For hardened solutions			
Средняя плотность, кг/м ³ Average density, kg/m ³	2089	2114	В зависимости от вида раствора Depending on the type of solution
Прочность на сжатие, МПа Compressive strength, MPa	34,65	38	
Прочность на изгиб, МПа Bending strength, MPa	4,8	5	

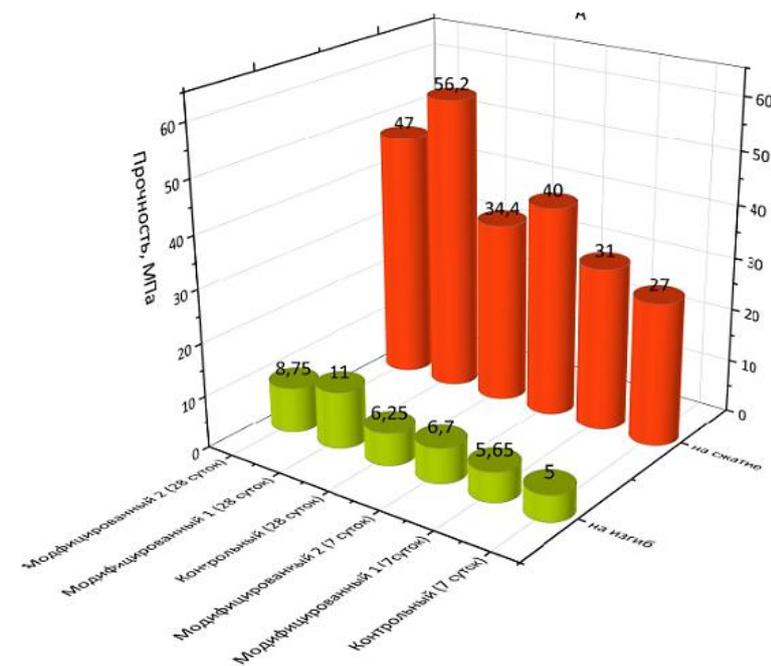


Рис. 8. Прочность на изгиб и на сжатие цементно-песчаных образцов
Fig. 8. Flexural and compressive strength of cement-sand specimens

Разработанные сухие строительные смеси с комплексными модифицирующими добавками технологически могут производиться на существующем оборудовании, используемом на предприятии сухих строительных смесей.

Заключение

В работе представлены результаты исследований влияния комплексной добавки $MCa+nano-SiO_2$ на свойства цементного камня и строительного раствора, а также возможности снижения расхода вяжущего без изменения физико-механических характеристик конечного продукта. Эффект действия добавок достигается за счет формирования структуры цементного камня на различных масштабных уровнях в соответствии с принципами полидисперсного соответствия и вещественного подобия, с использованием выбранных компонентов. Нанодиоксид кремния является инициатором самоорганизации структуры цементного камня. А при применении его в комплексе с микрокальцитом достигается синергетический эффект. Комплексная добавка позволяет получить прирост прочности на сжатие цементного камня до 51 %, а при сокращении расхода цементного вяжущего – до 47,5 %, и снизить водопотребность смеси. Предложены составы кладочных и ремонтных сухих строительных смесей с использованием модифицированного цемента, имеющие харак-

теристики, соответствующие нормативным документам. Полученные результаты исследований позволили установить возможность рационального использования карбонатных отходов (микрокальцита) горнодобывающих предприятий и кварц-содержащих вскрышных пород как компонентов комплексной модифицирующей добавки в цементные композиции, что позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу производства строительных материалов и внести вклад в решение экологических проблем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Национального исследовательского Московского государственного строительного университета в рамках конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций-членов Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» в целях исполнения Программы развития Национального исследовательского Московского государственного строительного университета на 2021–2030 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Исследования (сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, ДТА) выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткач Е.В., Темирканов Р.И., Ткач С.А. Комплексное исследование модифицированного бетона на основе активированного микрокремнезема совместно с микроармирующим волокном для повышения эксплуатационных характеристик // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 215–226.
2. Загороднюк Л.Х., Гридчин А.М., Лесовик В.С. Тенденции развития производства сухих строительных смесей в России // Строительство и архитектура. – 2016. – № 12. – С. 6–14.
3. Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and research on cementitious material // Cement Concrete Research. – 2008. – № 38 (2). – P. 128–136.
4. Leblanc J.L. Filled polymers: science and industrial applications. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. – 428 p.
5. Particulate-filled polymer composites. 2nd ed. / Ed. by R. Rother. – New York: Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. – 560 p.
6. Alam M.A., Sherif E.-S.M., Al-Zahrani S.M. Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior // International Journal of Electrochemical Science. – 2013. – V. 8. – № 3. – P. 3121–3131.
7. Neilsen L. Mechanical properties of polymers and composites. – NY: Marcel Dekker, inc., 1974. – 556 p.
8. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
9. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 114–117.
10. Каприелов С.С., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны в современных сооружениях // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – Вып. 1. – С. 78–82.
11. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between mineral assemblages of rocks and their alkali reactivities // Cement Association of Japan Review. – 1987. – P. 292–295.
12. Urukhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P. Build Mater // Build. Mater. – 2014. – № 8. – P. 52–55.
13. Kim H., Lee S., Moon H. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin // Construction and Building Materials Journal. – 2007. – V. 21 (6). – P. 1229–1237.
14. Саркисов Ю.С., Асосков Ю.Ф. О некоторых путях энерго- и ресурсосбережения в производстве бетонных изделий // Вестник ТГАСУ. – 2010. – № 3. – С. 166–174.
15. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>
16. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2007. – 368 с.
17. Myhre B. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance // UNITECR'05: 9th Biennial Worldwide congress on refractories. – Orlando, Florida, USA, 2005. – P. 191–195.
18. Kjellsen K.O., Lagerblad B. Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars. – Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1995. – 41 p.
19. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite / T.A. Nizina, J.A. Sokolova, A.N. Chernov, D.R. Nizina, A.I. Popova, N.S. Kanaeva // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – V. 83 (7). – P. 83–91. DOI: 10.18720/MCE.83.8.
20. Эффективные порошковые композиции на техногенном сырье / А.Д. Толстой, И.А. Ковалева, А.П. Присяжнюк и др. // Современные строительные материалы, технологии и конструкции: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГТНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». – Грозный: ФГУП «ИПК "Грозненский"», 2015. – Т. 1. – С. 406–411.
21. Демьяненко О.В., Куликова А.А. Эффективность применения микрокальцита в производстве строительных композиций на цементной основе // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2017). Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2017. – С. 39–41.

22. Куликова А.А., Сухопарова В.Ю., Жеребилов И.И. Влияние минеральных дисперсных компонентов на свойства цементного вяжущего // Избранные доклады 68-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2022. – С. 78–82.
23. Гувалов А.А., Аббасова С.И., Кузнецова Т.В. Улучшение структуры высокопрочного бетона с применением модификаторов // Строительные материалы. – 2015. – № 12. – С. 78–80.
24. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, A.A. Kulikova, S.V. Samchenko, I.V. Kozlova, N.A. Lukyanova // Nanotechnologies in Construction. – 2022; – V. 14 (6). – P. 481–492. URL: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492> (дата обращения 15.06.2023).
25. Куликова А.А., Демьяненко О.В., Копаница Н.О. Влияние нанодиоксида кремния на свойства цементного камня // Качество. Технологии. Инновации: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2020. – С. 23–28.
26. Куликова, А.А., Демьяненко О.В. Модифицирующие добавки на основе наномодификаторов в производстве строительных материалов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 6. Строительство и архитектура. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 53–55.
27. Космачев П.В. Получение наноразмерного диоксида кремния плазменно-дуговым методом из высококремнеземистого природного сырья: дис. канд. техн. наук. – Томск, 2018. – 141 с.
28. Макарова И.А., Лохова Н.А. Физико-химические методы исследования строительных материалов. 2-е изд. – Братск: Изд-во БрГУ, 2011. – 139 с.

Поступила: 27.06.2023 г.

Прошла рецензирование: 07.07.2023 г.

Информация об авторах

Копаница Н.О., доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Демьяненко О.В., кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Куликова А.А., аспирант кафедры строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Ткач Е.В., доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения Московского государственного строительного университета.

Шестаков Н.И., кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства Московского государственного строительного университета.

Степина И.В., кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения Московского государственного строительного университета.

UDC 691.54

SECONDARY RESOURCES IN PRODUCTION OF COMPOSITE BUILDING MATERIALS BASED ON CEMENT

Natalya O. Kopanitsa¹,
kopanitsa@mail.ru

Olga V. Demyanenko¹,
demyanenko.olga.v@gmail.com

Anzhelika A. Kulikova¹,
lika.panda.19@gmail.com

Evgenia V. Tkach²,
ev_tkach@mail.ru

Nikolai I. Shestakov²,
nik.shestakov.1990@mail.ru

Irina V. Stepina²,
stepinaiv@mgsu.ru

¹ Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

² Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russia.

The relevance of the research is caused by the importance of the problem of rational use of natural resources in production of composite building materials. The possibility of partial replacement of natural non-renewable raw materials used in the production of multi-ton concrete and mortar mixtures based on cement with secondary products from the production of various industries will solve the problems of: resource saving, energy consumption and ecology. The construction industry is the largest consumer of by-products of mining enterprises: overburden and waste from mining and processing enterprises, which is hundreds of millions of tons per year. The most studied are the issues related to their use as fine and coarse aggregates in concrete and mortar mixtures for various purposes. The expansion of the possibility of using secondary products of mining enterprises in the production of composite building materials is associated with the production of active mineral additives, fillers in concrete and mortar mixtures, as well as energetically active nanomodifiers. The use of by-products of different chemical composition and dispersion makes it possible to control the processes of structure formation and hardening of composite materials based on cement and to obtain composite materials with the required performance properties.

The main aim of the research is to scientifically substantiate and investigate the possibility of using waste from mining enterprises as components in concrete and mortar mixtures based on cement.

Objects: modifying additives based on secondary products; composite materials with enhanced performance properties.

Methods: determination of the mobility of mixtures, normal density, hardening time, flexural and compressive strength according to SS; thermal analysis; electron microscopy, x-ray phase analysis, colorimetry.

Results. The paper introduces the results of studies necessary for scientific substantiation, development and implementation in the construction industry of the technology for production of building mortar mixtures obtained using secondary products of mining enterprises as well as the comparative results of studies on the effect of a complex additive of microcalcite and nano-SiO₂ on the properties of cement systems. It is shown that the introduction of a complex additive increases the compressive strength of cement stone, reduces the consumption of cement without reducing its standard characteristics and improves the performance properties of concrete.

Key words:

Binder, cement compositions, microcalcite, nanomodifying additives, by-products of manufacturing.

The study was financially supported by National Research Moscow State University of Civil Engineering as part of the 2023 competition for fundamental and applied research (R&D) by research teams of organizations that are members of the Industry Consortium «Construction and Architecture» in order to implement the Program development of National Research Moscow State University of Civil Engineering for 2021–2030 as part of the implementation of the Strategic Academic Leadership Program «Priority 2030».

The studies (scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, DTA) were carried out using the equipment of the Tomsk Regional Center for Collective Use of the National Research Tomsk State University.

REFERENCES

1. Tkach E.V., Temirkanov R.I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilica together with micro-reinforcing fiber to improve performance. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 215–226. In Rus.
2. Zagorodnyuk L.H., Gridchin A.M., Lesovik V.S. Tendentsii razvitiya proizvodstva sukhikh stroitelnykh smesey v Rossii

- [Trends in the development of the production of dry building mixtures in Russia]. *Stroitelstvo i arkhitektura*, 2016, no. 12, pp. 6–14.
3. Scrivener K.L., Kirkpatrick R.J. Innovation in use and research on cementitious material. *Cement Concrete Research*, 2008, no. 38 (2), pp. 128–136.
 4. Leblanc J.L. *Filled polymers: science and industrial applications*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 428 p.
 5. *Particulate-filled polymer composites*. 2nd ed. Ed. by R. Rother. New York, Knovel, Rapra Technology Limited, 2008. 560 p.
 6. Alam M.A., Sherif E.-S.M., Al-Zahrani S.M. Fabrication of various epoxy coatings for offshore applications and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior. *International Journal of Electrochemical Science*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 3121–3131.
 7. Neilsen L. *Mechanical properties of polymers and composites*. NY, Marcel Dekker, inc., 1974. 556 p.
 8. Bazhenov Yu.M., Demyanov V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony* [Modified high-quality concrete]. Moscow, Association of Building Universities publ., 2006. 368 p.
 9. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders. *Cement Association of Japan Review*, 1987, pp. 114–117.
 10. Kapriylov S.S., Kardumyan G.S. Novyye modifitsirovannyye betony v sovremennykh sooruzheniyakh [New modified concretes in modern structures]. *Beton i zhelezobeton. Oborudovanie. Materialy. Tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 78–82.
 11. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between mineral assemblages of rocks and their alkali reactivities. *Cement Association of Japan Review*, 1987, pp. 292–295.
 12. Urukhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P. Build Mater. *Build. Mater*, 2014, no. 8, pp. 52–55.
 13. Kim H., Lee S., Moon H. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials Journal*, 2007, vol. 21 (6), pp. 1229–1237.
 14. Sarkisov Yu.S. On some ways of energy and resource saving in the production of concrete products. *Vestnik TGASU*, 2010, no. 3, pp. 166–174. In Rus.
 15. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Complex additives based on secondary resources for the modification of cement compositions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 136–144. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>
 16. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. *Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials from industrial waste]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007. 368 p.
 17. Myhre B. Microsilica in refractory castables. How does microsilica quality influence performance. *UNITECR'05: 9th Biennial Worldwide congress on refractories*. Orlando, Florida, USA, 2005. pp. 191–195.
 18. Kjellsen K.O., Lagerblad B. *Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1995. 41 p.
 19. Nizina T.A., Sokolova J.A., Chernov A.N., Nizin D.R., Popova A.I., Kanaeva N.S. Filled epoxy composites based on polyfraction microcalcite. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 83 (7), pp. 83–91. DOI: 10.18720/MCE.83.8.
 20. Tolstoy A.D., Kovaleva I.A., Prisyazhnyuk A.P. Effektivnyye poroshkovyye kompozitsii na tekhnogennom syr'e [Effective powder compositions based on technogenic raw materials]. *Sovremennyye stroitelnye materialy, tekhnologii i konstruksii. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu FGBOU VPO «GGNTU im. akad. M.D. Millionshchikov»* [Modern building materials, technologies and structures. Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the FGBOU VPO «GGNTU named after I.I. acad. M. D. Millionshchikov»]. Grozny, IPK «Groznskiy Publ.», 2015. Vol. 1, pp. 406–411.
 21. Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effektivnost primeneniya mikrokaltsita v proizvodstve stroitelnykh kompozitsiy na tsementnoy osnove [Efficiency of using microcalcite in the production of building compositions based on cement]. *Molodezh, nauka, tekhnologii: novyye idei i perspektivy (MNT-2017). Izbrannyye doklady IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Youth, Science, Technology: New Ideas and Perspectives (MNT-2017). Selected reports of the IV International scientific conference of students and young scientists]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2017. pp. 39–41.
 22. Kulikova A.A., Sukhoparova V.Yu., Zherebilov I.I. Vliyaniye mineralnykh dispersnykh komponentov na svoystva tsementnogo vyazhushchego [Influence of mineral dispersed components on the properties of cement binder]. *Izbrannyye doklady 68-y Universitetskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Selected reports of the 68th University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists]. Tomsk, Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 2022. pp. 78–82.
 23. Guvalov A.A., Abbasova S.I., Kuznetsova T.V. Improving the structure of high-strength concrete using modifiers. *Stroitelnye materialy*, 2015, no. 12, pp. 78–80. In Rus.
 24. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Lukyanova N.A. Influence of activation methods on the structural and technological characteristics of nanomodified cement compositions. *Nanotechnologies in Construction*, 2022, vol. 14 (6), pp. 481–492. Available at: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492> (accessed 15 June 2023).
 25. Kulikova A.A., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O. Vliyaniye nanodioksida kremniya na svoystva tsementnogo kamnya [Influence of nanodioxide silicon on the properties of cement stone]. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kachestvo. Tekhnologii. Innovatsii* [Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. Quality. Technologies. Innovations]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2020. pp. 23–28.
 26. Kulikova A.A., Demyanenko O.V. Modifitsiruyushchie dobavki na osnove nanomodifikatorov v proizvodstve stroitelnykh materialov [Modifying additives based on nanomodifiers in the production of building materials]. *Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk. Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. T. 6. Stroitelstvo i arkhitektura* [Prospects for the development of fundamental sciences. A collection of proceedings of the XVIII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Vol. 6. Construction and architecture]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2021. pp. 53–55.
 27. Kosmachev P.V. *Poluchenie nanorazmernogo dioksida kremniya plazmenno-dugovym metodom iz vysokokremnezemistogo prirodnogo syr'a*. Diss. Kand. nauk [Obtaining nanosized silicon dioxide by the plasma-arc method from high-silica natural raw materials. Cand. Diss.]. Tomsk, 2018. 141 p.
 28. Makarova I.A., Lokhova N.A. *Fiziko-khimicheskiye metody issledovaniya stroitelnykh materialov* [Physico-chemical methods for the study of building materials]. Bratsk, BrGU Publ., 2011. 139 p.

Received: 27 June 2023.

Reviewed: 7 July 2023.

Information about the authors

Natalya O. Kopanitsa, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Olga V. Demyanenko, Cand. Sc., senior lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building.

Anzhelika A. Kulikova, postgraduate student, Tomsk State University of Architecture and Building.

Evgenia V. Tkach, Dr. Sc., professor, Moscow State University of Civil Engineering.

Nikolai I. Shestakov, Cand. Sc., associate professor, Moscow State University of Civil Engineering.

Irina V. Stepina, Cand. Sc., associate professor, Moscow State University of Civil Engineering.