



Research Article

Received: February 4, 2024

Accepted: March 20, 2024

Published: April 7, 2024

ISSN 2658-5553

## Composite cements and shotcrete activated with enriched ash and slag mixtures

Panarin, Igor Ivanovich<sup>1</sup> Fediuk, Roman Sergeevich<sup>2,3</sup> Nagruzova, Liubov Petrovna<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Priamursky State University named after Sholom-Aleichem, Birobidzhan, Russian Federation; [yury.liseitsev@mail.ru](mailto:yury.liseitsev@mail.ru) (P.I.I.)

<sup>2</sup> Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation; [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru) (F.R.S.)

<sup>3</sup> Branch of the Federal State Budgetary Institution "CNIIP Ministry of Construction of Russia" DalNIIS, Vladivostok, Russian Federation; [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru) (F.R.S.)

<sup>4</sup> Khakass State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation; [L\\_nag@bk.ru](mailto:L_nag@bk.ru) (N.L.P.)

Correspondence: \* email [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru); contact phone [+79502817945](tel:+79502817945)

### Keywords:

Concrete; Composite; Binder; Superplasticizer; Cement; Ash and slag mixture; Strength

### Abstract:

The construction industry requires the use of effective materials that meet the growing needs in the design, construction, operation and repair of buildings and structures for various purposes. **The object of research is** the construction industry that requires the use of effective materials that meet the increasing needs in the design, construction, operation and repair of buildings and structures for various purposes. This work aims to develop a scientifically based technological solution aimed at creating effective composite cements activated with enriched ash and slag mixtures, and shotcrete based on them. **Methods.** A systematic study of the structure and properties of raw materials and cement composites was carried out. To create repair compositions, the theoretical provisions of the law of structure affinity were used. The physical and mechanical properties of the raw material and materials developed on its basis were determined using standard research methods: physical and chemical methods of analysis, laser granulometry, X-ray phase and differential thermal analysis, scanning electron microscopy, etc. **Results.** A scientifically based technological solution for producing shotcrete using composite cement has been proposed, which consists in the use of technogenic resources based on industrial waste (ash and slag mixtures) and construction (concrete scrap from dismantling buildings and structures), activated and homogenized in a vibration mill, which allows you to control the processes of structure formation due to the affinity of structures and the formation of high-strength new formations. The developed low rebound shotcrete mixture (<8%) provides compaction and strengthening of the adhesive contact zone with the base material of the concrete wall, leading to more efficient load transfer between layers and increasing the overall load-bearing capacity of the entire structure.

## 1 Introduction

Строительная отрасль требует применения эффективных материалов, обеспечивающих возрастающие потребности при проектировании, строительстве, эксплуатации и ремонте зданий и сооружений различного назначения [1], [2]. Также при этом необходимо решать проблемы, связанные с экологической безопасностью за счет привлечения для производства строительных материалов различных отходов, в том числе техногенных, к которым относятся золошлаковые

Panarin, I.; Fediuk, R.; Nagruzova, L.

Composite cements and shotcrete activated with enriched ash and slag mixtures; 2024; AlfaBuild; 32 Article No 3201. doi: 10.57728/ALF.32.1



смеси [3], [4]. Широкое применение получили торкрет-бетоны, позволяющие в кратчайшие сроки обеспечить ремонт и обновление зданий и сооружений [5], [6]. В качестве вяжущего для изготовления торкрет-бетонов традиционно используется цемент, однако, с учетом значительной экологической нагрузки от цементной промышленности, достижение улучшенных эксплуатационных характеристик можно добиться только в случае применения композиционных вяжущих материалов с учетом рационально подобранных водовяжущего отношения и гранулометрии компонентов [7], [8]. Поэтому создание составов и технологии торкрет-бетонов на базе композиционных цементов с улучшенным набором свойств, позволяющим обеспечить быстрое и надежное обновление существующих зданий и сооружений, является актуальной научной задачей [9], [10].

Сформирован значительный объем практико-ориентированных исследований, направленных на совершенствование рецептурно-технологических параметров торкрет-бетонов на основе различных видов портландцемента [11], полиминеральных добавок [12] и химических модификаторов [13], которые призваны оптимизировать технологические свойства бетонных смесей, а также физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики затвердевших композитов [14]. При этом остаются открытыми вопросы исследования и совершенствования торкрет-бетонов на композиционных цементах с позиции ресурсо-[13] и энергосбережения [15] за счёт рационального выбора сырья [16] и технологических приемов [17], что позволит получить дополнительный резерв повышения эксплуатационных характеристик [18].

В результате анализа литературных данных и выполненных обследований установлено аварийное состояние ряда железобетонных сооружений [19]–[21]. Налицо важность восстановления функциональной пригодности этих объектов [22], в том числе и для возможности эксплуатации в экстремальных условиях [23], для чего необходимо проведение комплекса ремонтных мероприятий с применением новых строительных материалов [24]. Для усиления несущих стен действующих городских железобетонных сооружений, перспективным является использование торкрет-бетонов, приводящих эти конструкции в соответствие нормативным требованиям (конструктивным и защитным) [25].

Выявлена необходимость расширения способов обогащения техногенного сырья для получения строительных композитов с различными заданными характеристиками, что важно для обеспечения эффективной эксплуатации железобетонных сооружений в экстремальных условиях [26], [27]. В связи с этим рабочей гипотезой стало предположение о том, что использование композиционных цементов (КЦ), содержащих в своем составе алюмосиликатное сырье техногенного происхождения (являющееся регулятором структурообразования на нано-, микро и макроуровнях), для изготовления торкрет-бетонов позволит обеспечить совокупность необходимых свойств несущих стен железобетонного сооружения.

Целью работы является разработать научно обоснованное технологическое решение, направленное на создание эффективных композиционных цементов, активированных обогащенными золошлаковыми смесями, и торкрет-бетонов на их основе.

Заявленная цель достигалась решением ряда задач:

- разработать энергоэффективную технологию получения композиционного цемента (КЦ) с применением обогащения (включающего флотацию и магнитную сепарацию) золошлаковых смесей ТЭЦ, а также многотоннажных отходов строительного комплекса (бетонного лома);
- обосновать составы, изучить физико-механические и технологические свойства КЦ;
- исследовать химический, минералогический и фазовый состав продуктов гидратации, а также микроструктуры цементного камня на композиционных цементах;
- разработать составы и изучить механические, строительно-технологические и эксплуатационные свойства торкрет-бетонов на КЦ.

## 2 Materials and Methods

В качестве компонентов композиционного цемента применялись портландцементный клинкер, гипс и алюмосиликатная составляющая (АСС), полученная по авторской, технологи из золошлаковых смесей Приморской ГРЭС путем обогащения флотацией и магнитной сепарацией (таблица 1), а также бетонный лом, взятый из фрагментов ремонтируемых зданий и сооружений. Учитывая, что промышленное обогащение золошлаковых смесей является малоэффективным, показывая уровень удаления нежелательных включений не выше 50% (при том, что в

лабораторных условиях достигается 90%), в работе были усовершенствованы технологические параметры флотации и магнитной сепарации. Полученная алюмосиликатная составляющая удовлетворяет требованиям к активным минеральным добавкам для цементов по Российскому государственному стандарту ГОСТ Р 56196–2014 [28].

**Table 1. Chemical composition of the original and enriched raw materials**  
**Таблица 1. Химический состав исходного и обогащенного сырья**

Сырье	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	п.п.п
ЗШС	45.1	19.6	7.9	12.9	0.5	1.5	0.4	0.9	0.9	10.3
АСС	58.8	25.0	1.3	11.0	0.5	1.5	0.1	0.9	0.9	-

В качестве мелкого заполнителя использовался отсев дробления гранитного щебня (АО «Востокцемент», г. Владивосток) с модулем крупности 2.7. Для снижения водопотребности бетонной смеси при сохранении ее требуемой подвижности использован суперпластификатор «Хидетал ГП9 альфа В» (ООО «СКТ-Стандарт», г. Коломна). Для ускорения схватывания торкрет-бетонов применялась сухая добавка «Реолен МС 451» (ООО «Гидрозо», г. Москва).

Все сырьевые материалы российского производства, что является важным в условиях введенных против России санкций и необходимости экспортоориентированности.

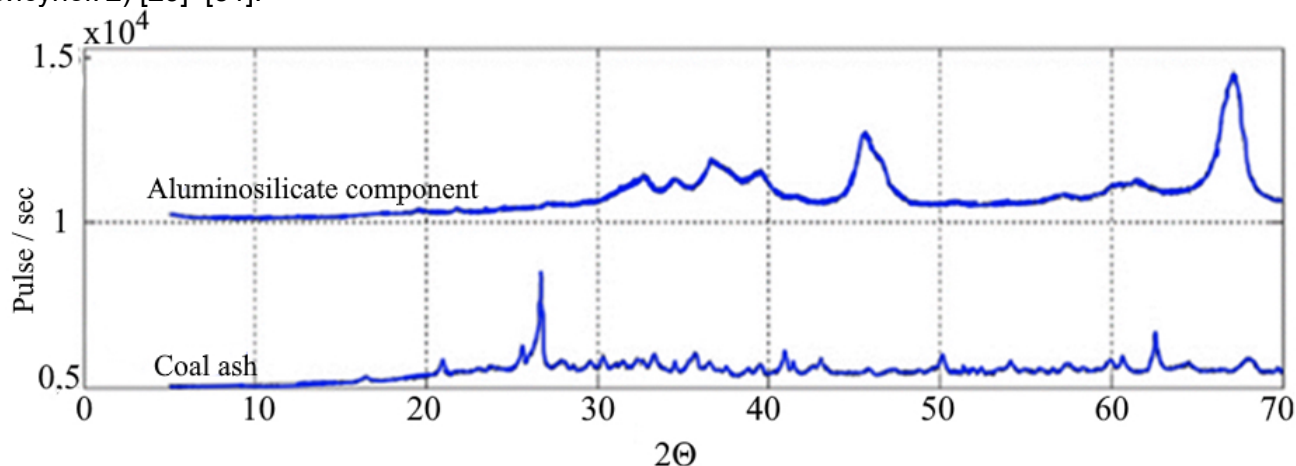
Термические исследования (ДТА, ТГ и ДСК) осуществлялись на приборе Shimadzu DTG-60H. Морозостойкость торкрет-бетонов для дорожных покрытий исследовалась по первому базовому методу F<sub>1</sub> на образцах с ребром 10 см, насыщенных водой.

Для оценки водонепроницаемости применялись цилиндрические образцы диаметром 150 мм и высотой 30 мм по методу мокрого пятна при поэтапном приложении давления (через 0.2 МПа каждые 4 часа) на установке УВБ-МГ4.01, позволяющей задавать давление до 2.0 МПа.

Прочность при сжатии определялась на кубках с ребром 70 мм.

### 3 Results and Discussion

В качестве добавки для регулирования процессов структурообразования использовалась АСС, полученная путем обогащения золошлаковых смесей с помощью флотации и магнитной сепарации (патент №2806396 от 30.05.2023 г.). Алюмосиликатная составляющая (рисунок 1) является обогащенным и более аморфным сырьем сравнительно с исходной золошлаковой смесью (подтверждается увеличением площади гало и уменьшением ширины соответствующих пиков на рентгенограмме), что будет положительно сказываться на реакционной способности (рисунок 2) [29]–[31].



**Fig. 1 - Increasing the amorphousness of the aluminosilicate component**  
**Рис. 1 - Повышение аморфности алюмосиликатной составляющей**

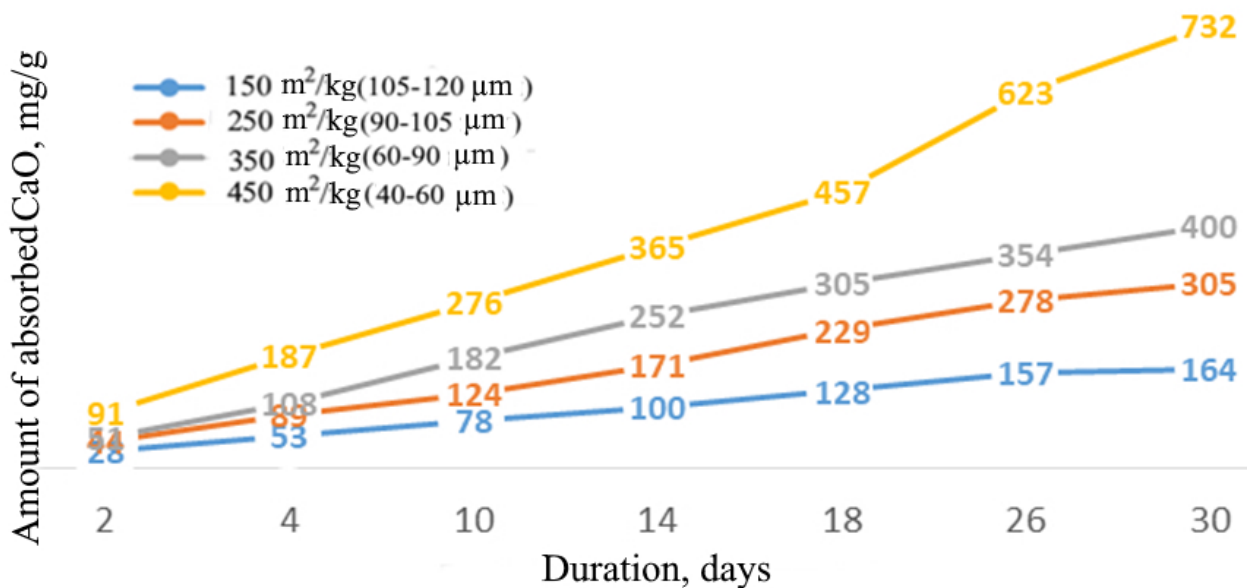


Fig. 2 - Activity of the aluminosilicate component

Рис. 2 - Активность алюмосиликатной составляющей

Разработана широкая номенклатура композиционных цементов, включающих портландцементный клинкер, замещенный до 65 мас. % алюмосиликатной составляющей, совместно измельченных с гипсом в вибрационной мельнице до удельной поверхности  $\approx 450$  м<sup>2</sup>/кг (таблица 2).

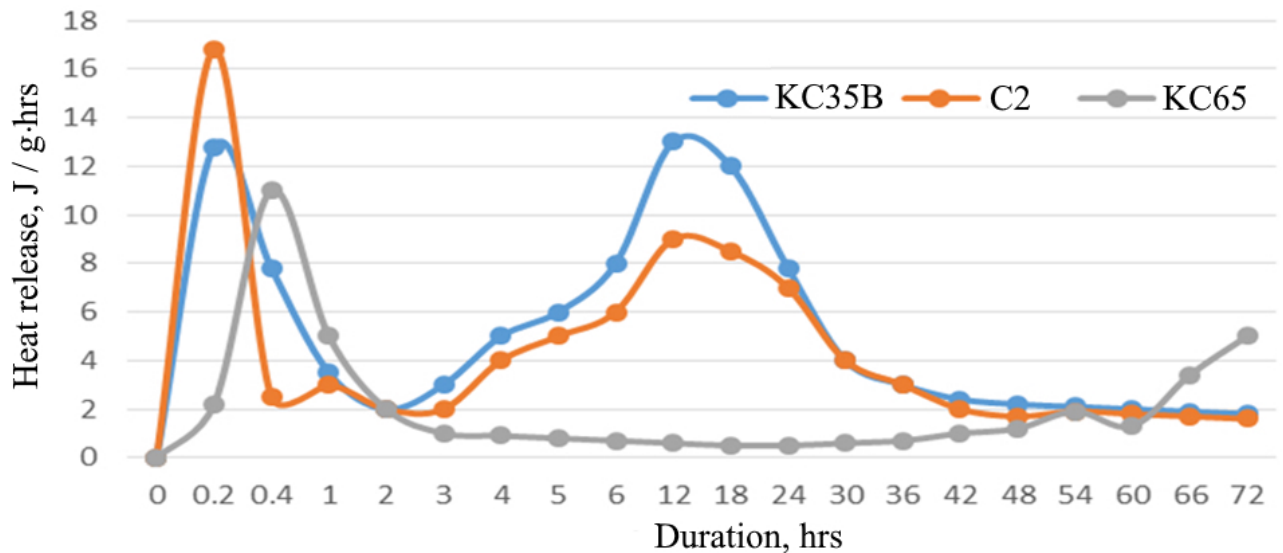
К рациональному составу КЦ-35 было отдельно добавлено 15 мас. % (от вяжущей основы) бетонного лома. Отмечается незначительное повышение активности, однако основной эффект достигнут при применении фрагментов бетонного лома ремонтируемых конструкций за счет реализации положений закона сродства структур.

Согласно результатам исследования кинетики тепловыделения цементов (рисунок 3), в период 2 часов после затворения вяжущего максимальное тепловыделение отмечается у тонкомолотого бездобавочного цемента (16.8 Дж/г·ч), однако затем компоненты композиционного цемента (АСС и бетонный лом) вступают в реакцию, приводя к максимальному тепловыделению в 12 часов.

Table 2. Compositions and activity of composite cements at W/C=0.5  
Таблица 2. Составы и активность композиционных цементов при В/Ц=0.5

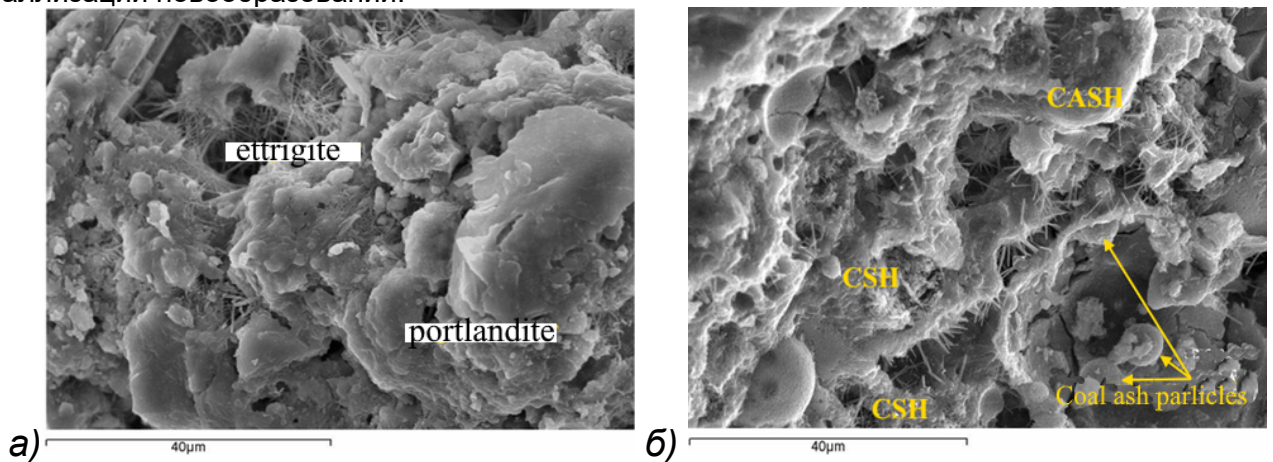
Маркировка	Состав				Активность, МПа 28 суток	Прирост активности по отношению к контролю, %
	Вяжущая основа, мас. %		Гипс, % от массы клинкера	Бетонный лом, мас. % от вяжущей основы		
	Клинкер	АСС				
Ц1*	100	-	5	-	45.9	-
Ц2	100	-		-	55.2	17
КЦ-15**	85	15		-	56.7	24
КЦ-25	75	25		-	59.2	29
<b>КЦ-35</b>	<b>65</b>	<b>35</b>		-	<b>67.7</b>	<b>47</b>
<b>КЦ-35Б</b>	<b>65</b>	<b>35</b>		<b>15</b>	<b>69.3</b>	<b>51</b>
КЦ-45	55	45		-	61.2	33
КЦ-55	45	55		-	56.1	22
КЦ-65	35	65		-	51.6	12

\* в качестве контроля выступал домолотый совместно с гипсом до  $\approx 300$  (Ц1) и 450 (Ц2) м<sup>2</sup>/кг портландцементный клинкер; \*\* цифра означает процентное содержание алюмосиликатной составляющей.



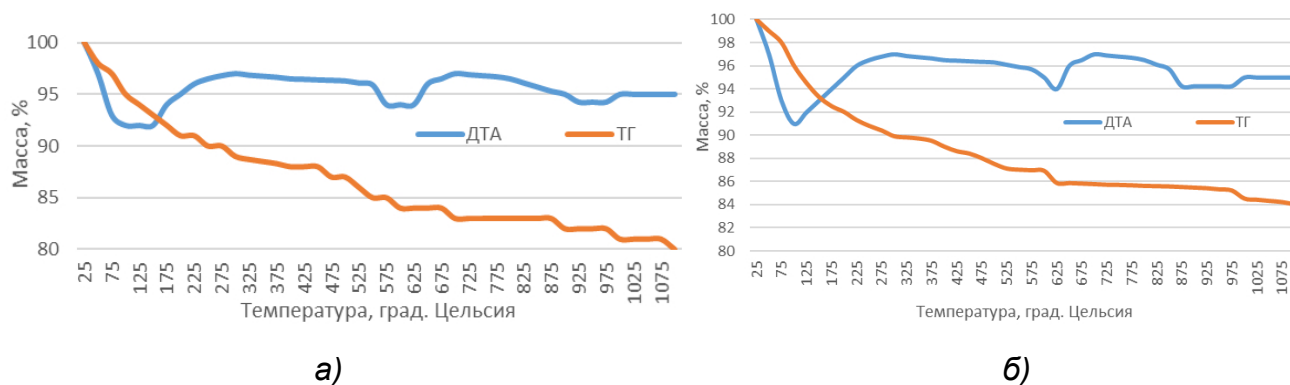
**Fig. 3 - Kinetics of heat release of binders**  
**Рис. 3 - Кинетика тепловыделения вяжущих**

Положительное влияние алюмосиликатной составляющей на прочностные свойства подтверждается исследованием микроструктуры цементного камня. В контрольном образце (рисунок 4 а) пустоты между частицами клинкера были заняты продуктами гидратации после твердения в течение 28 суток, но наблюдалось множество связанных капиллярных пор. При использовании АСС в количестве 35 мас. % (рисунок 4 б) наблюдались более плотные продукты гидратации, чем в контрольном составе. Заметно, что плотность упаковки кристаллогидратов значительно улучшается, блокируя поры. Кроме того, мелкодисперсные частицы алюмосиликатов заполняют мезо- и макропоры цементной матрицы, а также выступают в роли центров кристаллизации новообразований.



**Fig. 4 - Microstructure: a) control composition, b) composition with 35% ASC**  
**Рис. 4 - Микроструктура: а) контрольный состав, б) состав с 35% АСС**

Полученные результаты подтверждаются данными ДТА. Эндозффекты, как в составе с 35% АСС, так и в контрольном образце, имеют схожие картины, отличаясь лишь различиями в гидратных фазах: при 100-140°C (гидросиликатные CSH и трисульфатные алюмоферритные AFt фазы), 180°C (гидроалюминат  $C_4AH_{19}$ ), 600°C ( $Ca(OH)_2$ ), 750 и 780°C ( $CaCO_3$ ) и 940°C (CSH) (рисунок 5).

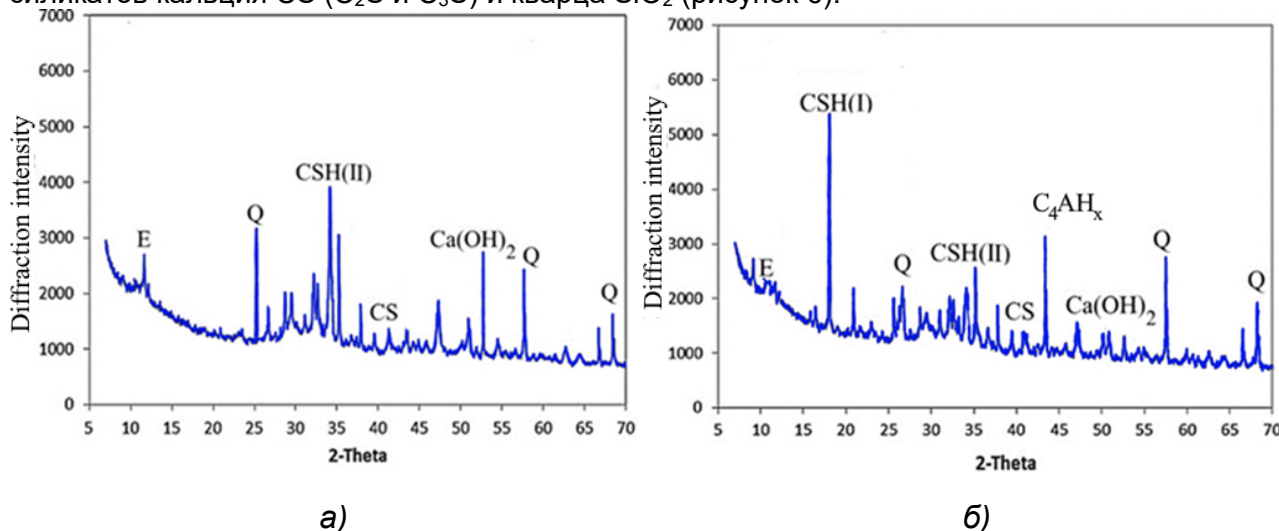


**Fig. 5 - Differential thermal analysis of samples: a) control composition, b) composition with 35% ASC**

**Рис. 5 - Дифференциально-термический анализ образцов: а) контрольный состав, б) состав с 35% АСС**

Снижение площади эндотермического эффекта, характеризующегося удалением физически связанной адсорбционной воды из продуктов гидратации, при 100-140°C для модифицированного цементного камня, показывает снижение содержания гелеобразных новообразований в результате их кристаллизации. Эндотермический эффект при температуре около 600°C соответствует дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Рост площади этого пика на термограмме контрольного цементного камня показывает большее содержание портландита в его составе. Также выявлен высокотемпературный гидросиликатный эндоэффект (940°C) в модифицированном образце КЦ-35, более выраженный, чем в немодифицированном образце Ц2.

Установлено повышенное количество отражений РФА для гидросиликатов кальция  $\text{CSH}(\text{I})$  и гидроалюминатов кальция  $\text{C}_4\text{AH}_x$ , со сниженным содержанием  $\text{CSH}(\text{II})$ , портландита  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , силикатов кальция  $\text{CS}$  ( $\text{C}_2\text{S}$  и  $\text{C}_3\text{S}$ ) и кварца  $\text{SiO}_2$  (рисунок 6).



**Fig. 6 - XRD analysis of samples: a) control composition, b) composition with 35% ASC**

**Рис. 6 - РФА образцов: а) контрольный состав, б) состав с 35% АСС**

Разработана широкая номенклатура торкрет-бетонов из композиционных цементах, измельченных до удельной поверхности 450 м<sup>2</sup>/кг (таблица 3). В качестве мелкого заполнителя применялся отсев дробления гранитного щебня с  $M_{кр}=2.7$ . Уровень замещения клинкера алюмосиликатной составляющей варьировался от 0 до 35 мас.%. Водовязущее отношение находилось в пределах 0.3–0.4. Отношение «вязущее: заполнитель» составляло 1:3.

**Table 3. Shotcrete compositions**  
**Таблица 3. Составы торкрет-бетонов**

№ состава	Расход, кг на 1 м <sup>3</sup>	В/В
-----------	--------------------------------	-----



	Клинкер	АСС	Бет. лом	Гипс	Вода	СП	Реолен	Отсев (M <sub>кр</sub> =2.7)	
ТБ1(Ц2)	450	-	-	22.5	135	-	2.25	1350	0.3
ТБ2(Ц2)	450	-	-	22.5	157.5	-	2.25	1350	0.35
ТБ3(Ц2)	450	-	-	22.5	180	-	2.25	1350	0.4
ТБ4(КЦ-15)	382.5	67.5	-	19.1	135	1.125	2.25	1350	0.3
ТБ5(КЦ-15)	382.5	67.5	-	19.1	157.5	1.125	2.25	1350	0.35
ТБ6(КЦ-15)	382.5	67.5	-	19.1	180	1.125	2.25	1350	0.4
ТБ7(КЦ-25)	337.5	112.5	-	16.9	135	2.25	2.25	1350	0.3
ТБ8(КЦ-25)	337.5	112.5	-	16.9	157.5	2.25	2.25	1350	0.35
ТБ9(КЦ-25)	337.5	112.5	-	16.9	180	2.25	2.25	1350	0.4
ТБ10(КЦ-35Б)	248.6	133.9	67.5	12.5	135	3.375	2.25	1350	0.3
ТБ11(КЦ-35Б)	248.6	133.9	67.5	12.5	157.5	3.375	2.25	1350	0.35
ТБ12(КЦ-35Б)	248.6	133.9	67.5	12.5	180	3.375	2.25	1350	0.4

Технологические свойства торкрет-бетонов и развитие их плотности при-ведено в таблице 4. Достижение равной жесткости торкрет-бетонов (20-22 с) осуществлялось благодаря варьированию дозировки суперпластификатора, обладающего высокой водоредуцирующей способностью (40%).

**Table 4. Water separation characteristics of shotcrete mixtures**  
**Таблица 4. Показатели водоотделения торкрет-бетонных смесей**

Состав	Водоотделение с течением времени в минутах, %								
	15	30	45	60	75	90	120	230	
ТБ1	0.4	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	6.5	12.5	
ТБ2	0.5	1.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	13.5	
ТБ3	1	2	3.5	4.8	5.9	6.7	7.9	14.0	
ТБ4	0.5	1	1.5	1.8	2.5	3.0	3.5	6.5	
ТБ5	1	1.5	2	2.5	3.0	3.3	3.6	7.5	
ТБ6	1.2	1.5	2.5	3.6	4.5	5	5.5	10.5	
ТБ7	0.5	1.2	1.8	2.2	2.9	3.7	3.9	6.4	
ТБ8	0.8	1.3	2.1	2.7	3.8	4.6	4.8	7.3	
ТБ9	1.5	2.5	3.5	4.5	6.5	6.5	8.5	13.5	
ТБ10	0.5	1	1.5	1.8	2.3	2.8	3.0	6.3	
ТБ11	0.7	1.4	1.7	2.0	2.4	2.9	3.1	7.6	
ТБ12	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	8.5	16.0	

Установлено низкое водоотделение до 16% через 230 минут. Соответственно, данные материалы могут эффективно применяться для торкрет-бетонных работ.

Установлено повышение плотности затворенной смеси с увеличением содержания АСС в КЦ (таблица 5). Это объясняется заполнением мелкодисперсными частицами тонкомолотого КЦ пустот, формирующихся в процессе гидратации. Введение алюмосиликатной составляющей в малых количествах (до 25 мас. %) незначительно повышает 28-дневную плотность цементного камня (2.0–4.6%). С повышением дозировки АСС (до 35 мас. %) отмечен рост плотности 28-суточных образцов, линейно растущий с увеличением количества введенных алюмосиликатов. Это объясняется уплотнением цементного камня в результате пуццолановой реакции и ускорения кинетики гидратации клинкерных минералов. Повышение объемной доли высокоплотной фазы С-S-H геля будет способствовать снижению объема содержания гелевой субмикроструктуры.

**Table 5. Properties of shotcrete mixture and density development**  
**Таблица 5. Свойства торкрет-бетонной смеси и развитие плотности**



Состав	Жесткость, с	Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность на 28 суток ( $\Delta\rho^{28}$ ), кг/м <sup>3</sup>
ТБ1	20	1960	1878
ТБ2	21	1982	1899(+1.1%)
ТБ3	22	2005	1899(+1.1%)
ТБ4	20	1957	1916(+2.0%)
ТБ5	21	1980	1917(+2.1%)
ТБ6	22	2002	1936(+3.1%)
ТБ7	20	1956	1963(+4.5%)
ТБ8	21	1979	1964(+4.6%)
ТБ9	22	2001	1953(+4.0%)
ТБ10	20	1953	1951(+3.9%)
ТБ11	21	1976	1976(+5.2%)
ТБ12	22	1998	1996(+6.3%)

Эффект повышения прочности на сжатие торкрет-бетонов на КЦ, возрастал при увеличении дозировки АСС до 35 мас. %, и при этом максимальный эффект отмечается для значений ранней прочности, в частности, в возрасте 2 суток приращение прочности на сжатие по сравнению с бездобавочным составом было 62%, а на растяжение при изгибе 49%. Это же подтверждается высокими отношениями значений прочностных свойств во 2 сутки к аналогичным показателям в марочном возрасте: для прочности на сжатие 0.41 (0.33 у бездобавочных клинкерных композитов), для прочности на растяжение при изгибе 0.30 (0.26 у бездобавочных клинкерных составов). Высокая ранняя прочность позволяет применять торкрет-бетон для срочного ремонта железобетонных объектов (таблица 6).

Применение разработанных материалов проводилось при усилении бетонной стены подземного перехода толщиной 20 см слоем торкрет-бетона толщиной 6 см. Для обеспечения надежной совместной работы усиленной стены применены теоретические положения закона сродства структур при проектировании ремонтных торкрет-бетонов. Для этого, в рациональный состав ТБ11 ввели 15% бетонного лома от массы вяжущего. Бетонный лом взят из отслоившихся фрагментов усиливаемых железобетонных блоков с последующим совместным измельчением с компонентами композиционного цемента до удельной поверхности 450 м<sup>2</sup>/кг. Несущая способность стены увеличилась более, чем в 2 раза: с 15.2 до 33.8 МПа (таблица 7).

Это обеспечивается тем, что прочность ремонтного слоя торкрет-бетона ТБ11 на 28 суток составляет 74.4 МПа, а также уплотнением и упрочнением контактной зоны в результате применения положений закона сродства структур при проектировании материалов, что привело к увеличению адгезии в 1.5 раза.

**Table 6. Mechanical properties of developed shotcrete concretes**  
**Таблица 6. Механические свойства разработанных торкрет-бетонов**

Свойства	ТБ1	ТБ2	ТБ3	ТБ4	ТБ5	ТБ6	ТБ7	ТБ8	ТБ9	ТБ10	ТБ11	ТБ12
Прочность на сжатие, МПа												
на 2 сутки	8.9	23.6 (+25%)	23.8 (+26%)	25.6 (+36%)	28.9 (+53%)	28.2 (+49%)	27.4 (+45%)	29.4 (+56%)	28.9 (+53%)	28.7 (+52%)	30.5 (+62%)	28.1 (+49%)
на 7 суток	32.7	34.8 (+6%)	33.6 (+3%)	35.0 (+7%)	37.1 (+13%)	36.2 (+11%)	36.1 (+10%)	38.2 (+17%)	37.3 (+14%)	37.2 (+14%)	39.3 (+20%)	38.4 (+17%)
на 28 суток	56.9	59.2 (+4%)	58.1 (+2%)	64.2 (+13%)	72.3 (+27%)	68.8 (+21%)	68.5 (+20%)	73.5 (+29%)	72.3 (+27%)	70.0 (+23%)	74.4 (+31%)	70.4 (+24%)
$R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$	0.33	0.40	0.41	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.40
Прочность на растяжение при изгибе, МПа												
на 2 сутки	2.1	2.6 (+24%)	2.6 (+24%)	2.7 (+29%)	3.1 (+47%)	3.1 (+47%)	3.1 (+47%)	3.1 (+47%)	3.1 (+47%)	3.1 (+47%)	3.2 (+49%)	3.1 (+47%)
на 7 суток	4.3	4.5 (+2%)	4.4 (+1%)	4.9 (+14%)	5.2 (+21%)	5.1 (+19%)	5.1 (+19%)	5.3 (+23%)	5.2 (+21%)	5.2 (+21%)	5.5 (+28%)	5.4 (+26%)
на 28 суток	8.0	8.3 (+4%)	8.1 (+1%)	9.6 (+20%)	10.8 (+35%)	10.3 (+29%)	10.3 (+29%)	10.5 (+31%)	10.8 (+35%)	10.5 (+31%)	11.2 (+40%)	10.6 (+32%)

$R_{из}^2 / R_{из}^{28}$	0.26	0.30	0.27	0.31	0.30	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
$R_{из}/R_{сж.}, 2 \text{ сут.}$	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
$R_{из}/R_{сж.}, 7 \text{ сут.}$	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
$R_{из}/R_{сж.}, 28 \text{ сут.}$	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

**Table 7. Results of reinforcement of the wall of a reinforced concrete structure**  
**Таблица 7. Результаты усиления стены железобетонного сооружения**

Состав торкрет-бетона	Прочность на сжатие до усиления, МПа	Прочность на сжатие после усиления, МПа	Адгезия к бетону, МПа	Толщина стены до усиления, см	Толщина стены после усиления, см
ТБ11 (на КЦ-35)	15.2	33.8	2.9	20	26

Изучение ударной выносливости разработанных материалов подтвердило, что с ростом содержания алюмосиликатной составляющей увеличивается количество трещин перед разрушением образца и ширина их раскрытия. Коэффициент извилистости трещин, являющийся соотношением траектории трещины  $l_f$  к расстоянию  $l_s$  соединяющему ее начальную и конечную точки, достигал высоких значений от 1.53 до 1.68, как это показано на рисунке 7.



**Fig. 7 - XRD analysis of samples: a) control composition, b) composition with 35% ASC :**  
 $K_{сув} = l_f / l_s$ : 1 - (52 cm)/(34 cm) = 1.53; 2 - (58 cm)/(35 cm) = 1.66; 3 - (57 cm)/(34 cm) = 1.68

**Рис. 7 - Характер разрушения образца ТБ11. Коэффициент извилистости на различных участках :  $K_{сув} = l_f / l_s$ : 1 - (52 см)/(34 см) = 1.53; 2 - (58 см)/(35 см) = 1.66; 3 - (57 см)/(34 см) = 1.68**

Применение композиционного цемента позволило добиться выдерживания в несколько раз большего числа ударов до отказа исследуемого образца: для состава ТБ11 составляло 171, что на 584% выше аналогичной характеристики для контрольного образца (таблица 8).

**Table 8. Impact strength characteristics of shotcrete**  
**Таблица 8. Характеристики ударной прочности торкрет-бетонов**

Состав	Количество ударов до образования первой трещины $N_{ff}$	Ударная энергия до образования первой трещины, Дж	Количество ударов до разрушения образца $N_{сд}$	Ударная энергия до разрушения образца, Дж	Коэффициент ударной вязкости $\mu = N_{сд} / N_{ff}$
ТБ1	5	295	25	1475	5
ТБ2	5	295	30	1770	6 (+20%)
ТБ3	4	236	20	1180	5
ТБ4	8 (+60%)*	472	48 (+92%)	2832	6 (+20%)
ТБ5	9 (+80%)	531	63 (+152%)	3717	7 (+40%)
ТБ6	7 (+40%)	413	42 (+68%)	2478	6 (+20%)
ТБ7	12 (+140%)	708	84 (+236%)	4956	7 (+40%)
ТБ8	13 (+160%)	767	104 (+316%)	6136	8 (+60%)
ТБ9	12 (+140%)	708	84 (+236%)	4956	7 (+40%)
ТБ10	18 (+260%)	1062	144 (+468%)	8496	8 (+60%)



ТБ11	19 (+280%)	1121	171 (+584%)	10089	9 (+80%)
ТБ12	18 (+260%)	1062	144 (+468%)	8496	8 (+60%)

\* - в скобках процентный прирост по сравнению с контрольным составом ТБ1

Характеристики водонепроницаемости разработанного торкрет-бетона (с 35 мас. % алюмосиликатной составляющей), определённые по отсутствию фильтрования воды на противоположной грани кубического образца с ребром 10 см на протяжении 12 часов при давлении 1 МПа), показывали эффективную работу под давлением 1.6 МПа (марка W16) (таблица 9).

Изучая кинетику водопоглощения материалов, установлено, что при модифицировании разработанного торкрет-бетона, с повышением содержанием АСС, снижается размерность и объем капиллярной пористости материала, что подтверждается ростом марки по водонепроницаемости с W6 до W16, а также марки по морозостойкости с F<sub>1</sub>200 до F<sub>1</sub>300.

Объем и размерность открытых капиллярных пор снижались с ростом содержания алюмосиликатной составляющей до 35 мас. %, закономерно уменьшая значения фильтрации. Это объясняется ускорением кинетики гидратации клинкерных минералов и ростом содержания гидросиликатного геля с формированием вторичных низкоосновных новообразований цементного камня.

На основании полученных экспериментальных данных, установлены статистические зависимости между прочностью и K<sub>f</sub> (рисунок 8).

Характеристики пористой структуры λ и однородности пор α, определенные по результатам исследования кинетики водонасыщения W<sub>t</sub>(t), зависели от содержания АСС. Взаимосвязь этих показателей через значение максимального изменения массы образца W<sub>max</sub> по формуле:  $W_t(t) = W_{max} [1 - e^{-(\lambda_1 t)^\alpha}]$  приведена на рисунке 9.

Относительные деформации образцов, обусловленные увеличением их длины от действия сульфатов, составляют менее 0.10% за 12 мес., что позволяет отнести разработанный композиционный цемент к сульфатостойкой группе.

**Table 9. Durability characteristics of shotcrete**  
**Таблица 9. Характеристики долговечности торкрет-бетонов**

Состав	Прочность на сжатие, МПа	Марка по водонепроницаемости	Прочность на сжатие после количества циклов, МПа				Марка по морозостойкости	Потеря массы, %	Причина прекращения испытаний
			250	300	350	400			
ТБ1	56.9	W6	54.3 (-4.51%)	48.6 (-14.5%)	-	-	F <sub>1</sub> 200	1.9	прочность
ТБ2	59.2	W6	59.0 (-0.41%)	57.5 (-2.84%)	-	-	F <sub>1</sub> 200	2.1	масса
ТБ3	58.1	W6	57.8 (-0.52%)	56.6 (-2.63%)	-	-	F <sub>1</sub> 200	2.1	масса
ТБ4	64.2	W8	60.3 (-6.07%)	58.6 (-8.56%)	52.3 (-18.50%)	-	F <sub>1</sub> 300	1.9	прочность
ТБ5	72.3	W10	70.5 (-2.46%)	66.8 (-6.54%)	-	-	F <sub>1</sub> 200	2.1	масса
ТБ6	68.8	W10	65.4 (-5.01%)	63.4 (-7.82%)	-	-	F <sub>1</sub> 200	2.2	масса
ТБ7	68.5	W12	65.5 (-4.39%)	63.5 (-7.32%)	62.8 (-8.25%)	-	F <sub>1</sub> 300	2.2	масса
ТБ8	76.5	W12	68.4 (-5.39%)	72.1 (-5.69%)	70.0 (-8.56%)	64.2 (-16.11%)	F <sub>1</sub> 300	1.8	прочность
ТБ9	72.3	W12	65.5 (-6.39%)	66.9 (-7.47%)	65.4 (-9.58%)	-	F <sub>1</sub> 300	2.1	масса
ТБ10	70.0	W14	65.5 (-6.39%)	64.3 (-8.10%)	63.0 (-9.95%)	-	F <sub>1</sub> 300	2.2	масса
ТБ11	74.4	W16	70.5 (-5.23%)	69.6 (-6.50%)	68.6 (-7.85%)	-	F <sub>1</sub> 300	2.3	масса
ТБ12	70.4	W16	66.6 (-5.27%)	65.0 (-7.71%)	64.7 (-8.04%)	63.9 (-9.24%)	F <sub>1</sub> 300	2.2	масса

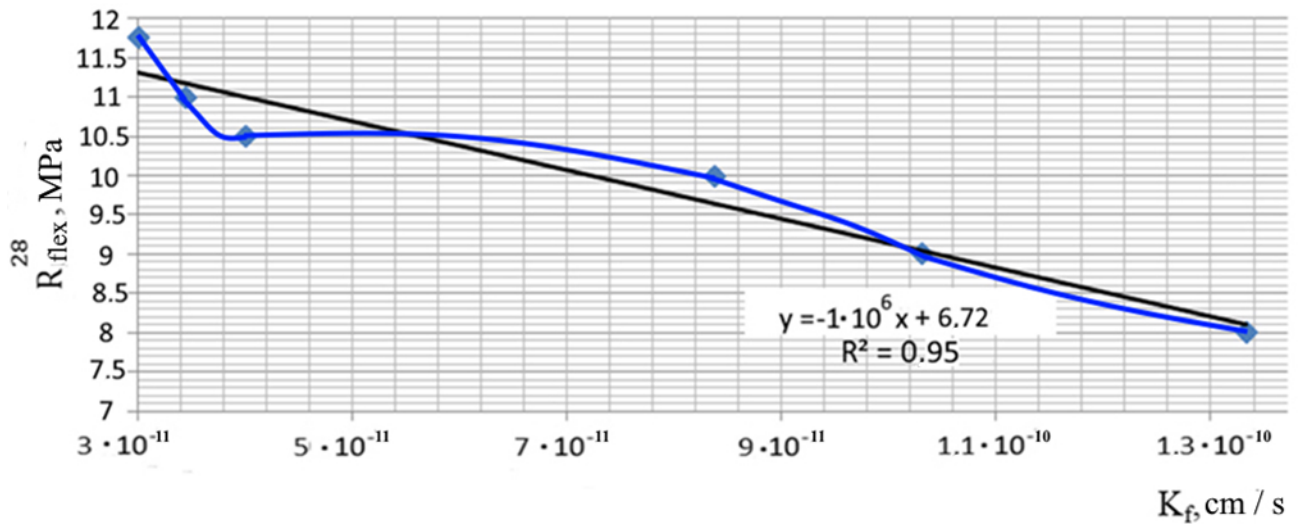


Fig. 8 - Relationship between tensile strength of shotcrete in bending and filtration coefficient  $K_f$   
 Рис. 8 - Зависимость между прочностью торкрет-бетона на растяжение при изгибе и коэффициентом фильтрации  $K_f$

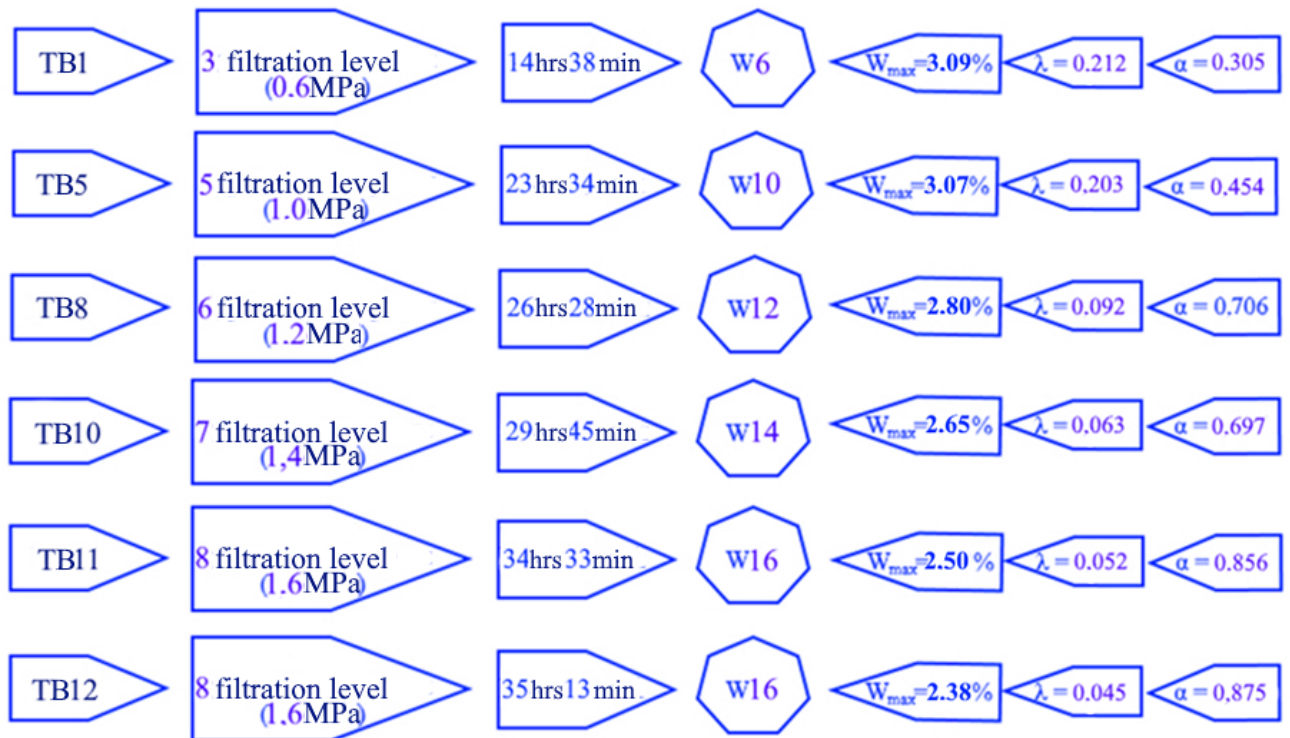


Fig. 9 - Water resistance, water absorption and pore structure characteristics of shotcrete  
 Рис. 9 - Водонепроницаемость, водопоглощение и характеристики поровой структуры торкрет-бетонов

Торкрет-бетоны соответствуют ТУ 5745-00116216892-06 (таблица 10).

Table 10. Compliance of developed shotcrete with standards  
 Таблица 10. Соответствие разработанных торкрет-бетонов нормам

Характеристика	ТБ	ТУ 5745-00116216892-06
Классы прочности на сжатие	B30-B60	B30-B60
Классы прочности на растяжение при изгибе	Btb3.6-Btb6.0	Btb6.0- Btb8.0
Марка по удобоукладываемости	Ж2-Ж3 (20–22 с)	Ж2-Ж4 (20–60 с)
Адгезия, МПа	4.4	2



Конец схватывания, мин	225-360	не нормируется
Равномерность изменения объема (расширение), мм	≤1.0	0–1.5
Марка по водонепроницаемости	W6-W16	W4-W12
Марка по морозостойкости	F <sub>1200</sub> -F <sub>1300</sub>	F50-F1000
Стойкость к сульфатной коррозии	сульфатостойкий	не нормируется
Отскок, мас. %	≤8	не нормируется

## 4 Conclusions

1. В развитие теории бетоноведения получены новые данные о технологических способах получения торкрет-бетонных смесей на основе композиционных цементов посредством энергосберегающих технологических процессов (усовершенствованы параметры флотации, магнитной сепарации и измельчения).

2. Предложено научно обоснованное технологическое решение получения торкрет-бетона на композиционном цементе, заключающееся в применении техногенных ресурсов на основе отходов промышленности (золошлаковых смесей) и строительства (бетонного лома от разборки зданий и сооружений), активированных и гомогенизированных в вибрационной мельнице, которое позволяет управлять процессами структурообразования за счет сродства структур и формирования высоко-прочных новообразований. Разработанная торкрет-бетонная смесь с низким значением отскока (<8%) обеспечивает уплотнение и упрочнение адгезионной контактной зоны с базовым материалом бетонной стены, приводя к более эффективной передаче нагрузок между слоями и увеличивая общую несущую способность всей конструкции.

3. Обоснован механизм управления структурообразованием высокоплотного (показатель средней размерности открытых капиллярных пор  $\lambda=0.052$ , показатель однородности размеров открытых капиллярных пор  $\alpha=0.856$ ) бетонного композита, основанный на комплексном эффекте компонентов композиционного цемента (алюмосиликатной составляющей и бетонного лома, подобранных и подготовленных по авторской технологии) рационального состава и гранулометрии. При усилении несущих железобетонных стен торкрет-бетоном на композиционных цементах адгезия между базовым и ремонтным слоями стены возрастает в 1.5 раза по сравнению с традиционным торкрет-бетоном.

4. Впервые выявлены закономерности влияния различных факторов (состава и пропорции исходных компонентов, параметров их помола) на повышение комплекса эксплуатационных характеристик ремонтных материалов: марки по водонепроницаемости до W16, водопоглощения менее 6 мас. %, марки по морозостойкости выше F<sub>1300</sub>. Научно обоснованы зависимости между количеством введенных алюмосиликатов из обогащенной золошлаковой смеси (до 35 мас. %), физико-механическими свойствами и характеристиками поровой структуры цементных композитов, в частности снижается показатель средней размерности открытых капиллярных пор в 4 раза и повышается показатель однородности размеров открытых капиллярных пор в 3 раза, что способствует существенному повышению прочностных свойств и эксплуатационных характеристик торкрет-бетонов.

## 5 Fundings

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН, тема № FWFN (0205)–2022–0002.

## References

- 1 Jackson, H.E. (1996) Ancient Peoples and Landscapes. Eileen Johnson, Editor. Museum of Texas Tech University, Lubbock 1995. *American Antiquity*, **61**, 802–803. <https://doi.org/10.2307/282024>
- 2 Malmgren, L. and Nordlund, E. (2008) Interaction of Shotcrete with Rock and Rock Bolts—A Numerical Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **45**, 538–553.



- <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.024>
- 3 Bernardo, G., Guida, A. and Mecca, I. (2015) Advancements in Shotcrete Technology. 591–602. <https://doi.org/10.2495/STR150491>
- 4 Heidarneshad, F. and Zhang, Q. (2022) Shotcrete Based 3D Concrete Printing: State of Art, Challenges, and Opportunities. *Construction and Building Materials*, **323**, 126545. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126545>
- 5 Choi, P., Yun, K.-K. and Yeon, J.H. (2017) Effects of Mineral Admixtures and Steel Fiber on Rheology, Strength, and Chloride Ion Penetration Resistance Characteristics of Wet-Mix Shotcrete Mixtures Containing Crushed Aggregates. *Construction and Building Materials*, **142**, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.093>
- 6 Bohac, M., Kubatova, D., Krejci Kotlanova, M., Khongova, I., Zedulova, A. and Stanek, T. (2021) The Role of SCM's on Rheology of Sprayed Mortar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1039**, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1039/1/012001>
- 7 Pan, G., Li, P., Chen, L. and Liu, G. (2019) A Study of the Effect of Rheological Properties of Fresh Concrete on Shotcrete-Rebound Based on Different Additive Components. *Construction and Building Materials*, **224**, 1069–1080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060>
- 8 Liu, G., Cheng, W., Chen, L., Pan, G. and Liu, Z. (2020) Rheological Properties of Fresh Concrete and Its Application on Shotcrete. *Construction and Building Materials*, **243**, 118180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118180>
- 9 Liu, Z., Bian, W., Pan, G., Li, P. and Li, W. (2018) Influences on Shotcrete Rebound from Walls with Random Roughness. Aizenshtein, M., Ed., *Advances in Materials Science and Engineering*, **2018**. <https://doi.org/10.1155/2018/7401358>
- 10 Bright Singh, S., Murugan, M., Chellapandian, M., Dixit, S., Bansal, S., Sunil Kumar Reddy, K., Gupta, M. and Maksudovna Vafaeva, K. (2023) Effect of Fly Ash Addition on the Mechanical Properties of Pervious Concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.165>
- 11 Wang, J., Tan, Y., Li, H., Wang, J. and Gao, Y. (2024) Comparative Study on the Moisture Transfer Properties of Shotcrete and Casting Concrete. *Construction and Building Materials*, **448**, 138133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138133>
- 12 Jia, Y., Zhao, L., Wang, L., Gao, Q., Qiao, B. and Zhao, Q. (2024) Study on Creep Performance of Shotcrete Lining for Tunnels. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.093>
- 13 Sabouri, H. and Yekrangnia, M. (2024) Experimental Study on the Pullout Behavior of Steel Rebars in Masonry Shotcreted Layer. *Results in Engineering*, **23**, 102670. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102670>
- 14 Wei, J., Rao, J., Wang, Y. and Wang, L. (2024) Mesoscopic Characteristics of Carbonate Erosion to Shotcrete. *Case Studies in Construction Materials*, **21**, e03717. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03717>
- 15 Liu, G., Liu, L., Liu, H. and Zheng, H. (2024) Investigating CO<sub>2</sub> Sequestration Properties of Biochar Shotcrete. *Construction and Building Materials*, **443**, 137779. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137779>
- 16 Garba, M.J., Tian, Y., Xie, Z., Yu, C., Hu, C., Chen, L. and Yuan, Q. (2024) Effect of Accelerators on the Long-Term Performance of Shotcrete and Its Improvement Strategies: A Review. *Journal of Building Engineering*, **89**, 109364. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109364>
- 17 Pan, G., Li, C., Laznovsky, J., Zikmund, T., Oberta, P., Kaiser, J., Li, P. and Chen, L. (2024) Research on the Distribution Law of Coarse Aggregate and Pore Structure in MWCNTs Modified Shotcrete. *Construction and Building Materials*, **426**, 135805.



- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135805>
- 18 Polat, H. and Özel, C. (2024) Investigation of Ferrochrome Slag Utilization in Wet Mix Shotcrete: Mechanical Strength and Radiation Shielding Performance. *Radiation Physics and Chemistry*, **223**, 111963. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111963>
- 19 Yan, Z., Zhang, J., Fan, Z., Chen, P., Fu, J., Ma, K., Feng, J., Chen, J. and Wang, S. (2024) Effect of Isobutyltriethoxysilane-Zeolite Powder (IBTES-ZP) on Impermeability of Shotcrete and Application. *Construction and Building Materials*, **435**, 136812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136812>
- 20 Lu, W., Wu, Y., Xu, Y., Tian, C., Meng, L., Li, S. and Liu, Y. (2024) Experimental Study on the Mechanical Properties of FRP Reinforced Shotcrete Lining of Tunnel in Extremely Fractured Surrounding Rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **149**, 105815. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105815>
- 21 Ning, F.W., Sui, W., Bai, Y. and Chen, B. (2024) Mass Distribution Characteristics of Wet-Mix Shotcrete during Spraying Process and Adhesion Process. *Construction and Building Materials*, **433**, 136485. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136485>
- 22 Fang, S., Xu, D., Zhao, Z., Song, Q. and Gui, W. (2024) Shotcrete Flatness Evaluation of Initial Linings Based on Vehicular LiDAR Scanning. *Automation in Construction*, **164**, 105475. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105475>
- 23 Polat, H. and Özel, C. (2024) Radiation Shielding Properties of Shotcrete Containing Different Aggregates. *Materials Chemistry and Physics*, **323**, 129596. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129596>
- 24 Wan, Z. and He, T. (2024) Influence of Accelerator Type on the Volume Stability of Shotcrete and the Establishment of Shrinkage Model. *Advances in Cement Research*, 1–14. <https://doi.org/10.1680/jadcr.23.00127>
- 25 Asheghi Mehmandari, T., Shokouhian, M., Imani, M. and Fahimifar, A. (2024) Experimental and Numerical Analysis of Tunnel Primary Support Using Recycled, and Hybrid Fiber Reinforced Shotcrete. *Structures*, **63**, 106282. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106282>
- 26 Zhang, G., Jiang, Z., Li, X., Chen, Y., Yang, B., Si, M., Feng, R. and Wang, M. (2024) Impact of High-Altitude Environments on the Motion and Settling Characteristics of Wet-Mix Shotcrete Dust in Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **149**, 105807. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105807>
- 27 Wang, Q., Gao, Y., Zhao, J., Hu, Z., Liu, W., Lv, H., Shao, T. and Wang, K. (2024) Acoustic Emission Based Experimental Study on Mechanical Properties and Damage Analysis of Carbon Nanotube Reinforced Fiber Shotcrete. *Journal of Building Engineering*, **93**, 109850. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109850>
- 28 (2014) GOST R 56196–2014. Active mineral additives for cements. General specifications. <https://docs.cntd.ru/document/1200114193>
- 29 Constantinides, G. and Ulm, F.J. (2007) The Nanogranular Nature of C-S-H. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.06.003>
- 30 Ulm, F.J. (2012) Nano-Engineering of Concrete. *Arab. J. Sci. Eng.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13369-012-0181-x>
- 31 Masoero, E., Del Gado, E., Pelleng, R.J.-M., Ulm, F.-J. and Yip, S. (2012) Nanostructure and Nanomechanics of Cement: Polydisperse Colloidal Packing. *Physical Review Letters*, **109**, 155503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.155503>