



Research Article

Received: November 1, 2023

Accepted: December 11, 2023

Published: January 5, 2024

ISSN 2658-5553

## Modified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements

Liseitsev, Yury Leonidovich<sup>1</sup> <sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation; yury.liseitsev@mail.ruCorrespondence: \* email yury.liseitsev@mail.ru; contact phone [+79190290138](tel:+79190290138)

### Keywords:

Concretes; Composite; Binder; Superabsorbent; Strength; Polymer

### Abstract:

The article summarizes the author's research results over the past few years. **The object of research** is nanomodified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements. The work aims to develop a scientifically based technological solution that ensures the production of modified fiber-reinforced concrete for road and airfield construction and a comprehensive study of their operational characteristics. **Method.** The particle size distribution of the composite binder was studied using laser granulometry. The technological properties of the mixture were determined by examining the flow sediment. The average density was calculated by dividing the mass of the sample by its volume. Compressive strength was studied under static load on a press on samples with a rib of 70 mm at 3, 7, and 28 days of age. **Results.** A technological solution has been substantiated and experimentally confirmed to ensure the production of basalt fiber-reinforced concrete on a modified composite binder (MCB), which consists of creating an ultra-high-density package of hydrate formations at the nanolevel using new non-traditional raw materials (aluminosilicates obtained using the developed technology, as well as hydrothermal nanosilica). As a result, MCB, together with basalt microfiber selected following the law of similarity, ensures an increase in tensile strength during the bending of fiber-reinforced concrete four times and impact endurance up to 9 times. The ratio of tensile bending and compressive strengths of 0.25 confirms effective performance under dynamic and impact loads. This fact ensures the efficiency of structure formation in the early stages (tensile strength during bending in 1 day is 3.6 MPa).

## 1 Introduction / Введение

Развитие цивилизации приводит к возрастанию нагрузок на объекты дорожно-транспортной [1], аэродромной [2] и космодромной [3] инфраструктуры. Для этих сооружений необходимы покрытия из эффективных строительных материалов с высокими значениями физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик (прочность [4], трещиностойкость [5], ударная выносливость [6], износостойкость [7], коррозионная стойкость [8], водонепроницаемость [9], морозостойкость [10] и т.д.), которых невозможно достичь при применении традиционных бетонов. Таким образом, представляется актуальным создание цементных материалов нового поколения на основе модифицированных композиционных вяжущих с применением вулканогенного гидротермального кремнезема и обогащенных техногенных ресурсов алюмосиликатного состава для получения эффективных дорожных и аэродромных покрытий.

К 2024 году накоплен пласт знаний по теоретическим основам производства дорожных покрытий на основе асфальтобетона [11] и цементобетона [12]. Детально исследованы механизмы структурообразования вяжущих на основе тонкомолотого портландцемента и кремнеземсодержащих компонентов: золы-уноса [13], метаксаолина [14], микрокремнезема [14], доменного гранулированного шлака [15], золошлаковой смеси ТЭЦ [16]. Несмотря на это, в ходе анализа мировой литературы не выявлено комплексных исследований по вопросам повышения эффективности материалов для дорожных и аэродромных цементобетонных покрытий с

Liseitsev, Y.

Modified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements;  
2024; *AlfaBuild*; 30 Article No 3001. doi: 10.57728/ALF.30.1



применением обогащенных алюмосиликатных компонентов техногенного происхождения и гидротермального нанокремнеземного модификатора.

Применение нового обогащенного механоактивированного техногенного сырья дает возможность управлять структурообразованием бетонов для дорожных [17] и аэродромных сооружений [18], позволяя повысить комплекс их эксплуатационных характеристик (ударная прочность [19], стойкость к истиранию [20], термическая стойкость [21] и т.д.[22]). Обеспечение необходимых характеристик может быть осуществлено в результате комплексного применения новых трансдисциплинарных подходов с учетом достижений различных наук: строительного материаловедения [23], химии [24], математики [25], микромеханики композиционных сред [26], экологии [27], геологии [28] и др. [29] Установлена важность расширения номенклатуры техногенного сырья для получения цементобетонов с различными целевыми эксплуатационными характеристиками, в том числе для работы в сложных условиях. В связи с этим, рабочей гипотезой стало предположение о том, что применение модифицированного вяжущего, полученного на основе активированного кремнеземсодержащего сырья в качестве регулятора структурообразования обеспечит получение эффективных дорожных и аэродромных цементобетонов, что в комплексе с базальтовой фиброй обусловит для высокоплотных изделий улучшение микроструктуры с повышением ударной вязкости и характеристик долговечности. Объект исследования: наномодифицированный фибробетон для дорожных и аэродромных покрытий. Предмет исследования: физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики данного материала. Цель работы: разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего производство модифицированных фибробетонов для дорожного и аэродромного строительства и комплексное исследование их эксплуатационных характеристик. К задачам по достижению поставленной цели относятся: дополнение теоретических положений о методах получения эффективных фибробетонов на разработанном модифицированном вяжущем; обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение базальтофибробетонов на модифицированном композиционном вяжущем; предложение феноменологической модели структурообразования цементобетонных дорожных покрытий; определение энергоэффективной технологии получения алюмосиликатного компонента.

## 2 Materials and Methods

В качестве компонентов модифицированного композиционного вяжущего (МКВ) применялись быстротвердеющий портландцемент ЦЕМ I 32.5Б, обогащенная золошлаковая смесь и гидротермальный аморфный нанокремнезем в двух формах - золя и порошка (предоставлен проф. В.В. Потаповым [30]). В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок с модулем крупности 2.4 из месторождений Приморского края. Для снижения водопотребности бетонной смеси при сохранении ее требуемой подвижности использован суперпластификатор Master Glenium 115 (BASF, Людвигсхафен, Германия). Для дисперсного армирования применялась базальтовая фибра ООО «Геостиль» (Нахабино, Россия).

Экспериментальные методы исследований включали следующие. Гранулометрический состав композиционного вяжущего изучали методом лазерной гранулометрии. Технологические свойства смеси определяли путем исследования расплыва конуса. Среднюю плотность рассчитывали путем деления массы образца на его объем. Прочность на сжатие изучали при статической нагрузке на прессе на образцах с ребром 70 мм в 3-, 7- и 28-дневном возрасте.

## 3 Results and Discussion

Моделирование процессов, протекающих при эксплуатации композиционных материалов нового поколения, возможно при применении трансдисциплинарного подхода. В частности, для оценки параметров, разрушающих структуру материала, необходимо комплексно учитывать эффект физических явлений и химических процессов.

Для оценки структуры цементного композита на субмикроруровне использовали возможности микромеханики композиционных сред. В работе этот подход проиллюстрирован на примере применения к гидросиликату кальция (C-S-H), который существует в трех структурно различных, но схожих по составу формах: с низкой плотностью (low density, LD), высокой плотностью (high



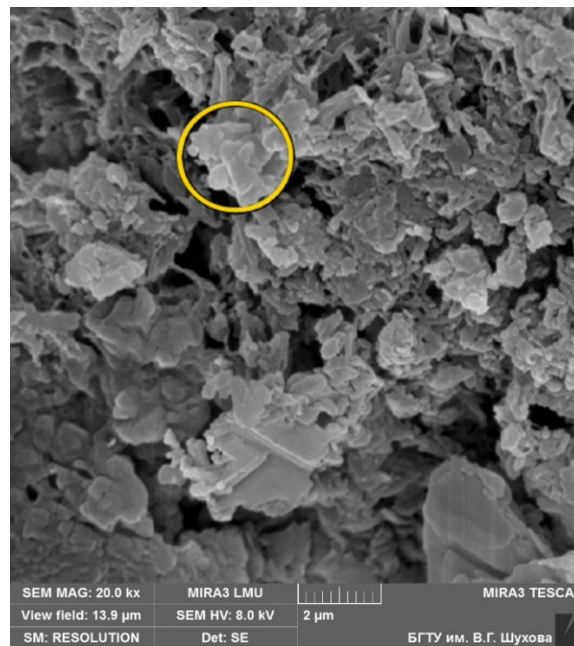
density, HD) и сверхвысокой плотностью (ultra-high density, UHD). Эти три формы отличаются только плотностью упаковки частиц менее 5 нм (0.64; 0.74 и 0.83 соответственно). Согласно теории диссипативной структуры, цементные композиты относятся к открытой системе. Добавление наноматериалов повышает энергию системы цементных композитов и импортирует негэнтропию в твердеющую систему, что повышает ее упорядоченность [31].

Установлено, что фундаментальные основы проектирования вяжущих могут быть реализованы путем применения новых нетрадиционных ресурсов, для чего была усовершенствована технология получения алюмосиликатного компонента из техногенного сырья (золотшлаковой смеси). Извлечение и подготовка алюмосиликатов проводилась по технологии, разработанной автором. Технология включает в себя 5 стадий: дезинтеграцию с сепарацией, флотацию, двухступенчатую магнитную сепарацию и сушку. В результате исследования кинетики механоактивации, выявлен характер влияния различных видов мельниц на размолоспособность компонентов разработанных вяжущих. Диспергирование компонентов в варио-планетарных мельницах оказывается более энергоэффективным по сравнению с вибрационными и шаровыми измельчителями. Кроме того, в результате комплексного сочетания истирающих, ударных и центробежных сил повышается потенциал получения более дисперсных активированных порошков (до 900 м<sup>2</sup> / кг).

Разработано композиционное вяжущее, включающее быстротвердеющий цемент ЦЕМ I 32.5Б, замещенный на 30% алюмосиликатным компонентом (АСК), совместно измельченные в варио-планетарной мельнице до удельной поверхности 550 м<sup>2</sup>/кг. Дальнейшие исследования были направлены на модификацию композиционного вяжущего на основе ЦЕМ I 32.5Б и АСК гидротермальным нанокремнеземом в виде золя и нанопорошка.

Приращение прочности на растяжение при изгибе и на сжатие модифицированного цементного камня, увеличивалось с ростом введенного количества нанокремнезема (до 6.7 и 50.2 МПа соответственно); при этом приращение прочности, отнесенное к дозировке нанокремнезема, показывало максимальные значения при низких дозировках, достигая 3700% (для суточной прочности на растяжение при изгибе при дозировке нанокремнезема 0.01%).

Для цементного камня, модифицированного порошком нано-SiO<sub>2</sub>, получены несколько более низкие результаты (R<sub>изг</sub> до 6.6 МПа, R<sub>сж</sub> до 48.6 МПа,). Этот результат можно объяснить более низкой эффективной поверхностью нанокремнезема в порошках в сравнении с золем из-за формирования фрактальных агломератов частиц в нанопорошке, приводя к снижению кинетики взаимодействия поверхности нанокремнезема с Ca(OH)<sub>2</sub> (пуццолановой реакции), особенно в начальный период гидратации (рисунок 1). Решение данной проблемы было осуществлено путем разработки и применения комплексной органоминеральной добавки (КОМД) «нанокремнезем + поликарбоксилатный суперпластификатор», распределяемой ультразвуком в воде затворения в течение 6 минут. Подобное распределение КОМД в воде затворения предотвращает коагуляцию и слипание частиц нанокремнезема в жидкой фазе твердеющих составов, что приводит к росту эффективной площади реакции поверхности нано-SiO<sub>2</sub> с гидроксидом кальция в процессе пуццоланового взаимодействия. Наивысшее дополнительное приращение прочности, как при изгибе, так и при сжатии, для всех возрастов находилось в диапазоне 15–20%.



**Fig. 1 - Formation of fractal agglomerates of  $\text{SiO}_2$  particles in a sample aged 1 day**  
**Рис. 1 - Образования фрактальных агломератов частиц  $\text{SiO}_2$  в образце в возрасте 1 суток**

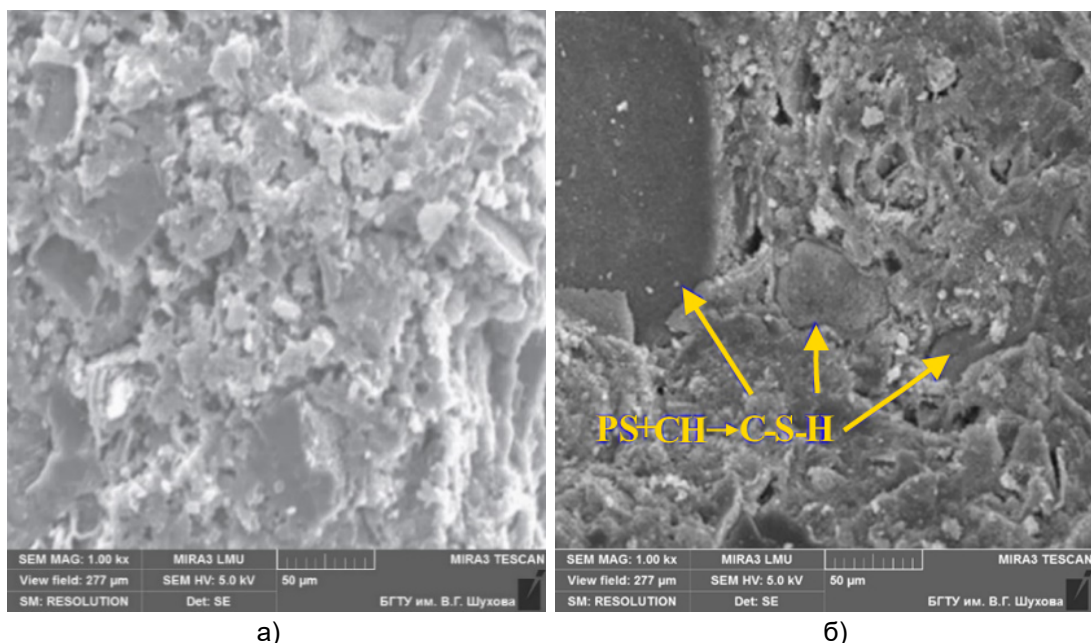
Важным для создания ударопрочной структуры является соотношение  $R_{\text{изг}}^{28}/R_{\text{сж}}^{28}$ , которое для модифицированных составов достигало 0.13–0.15 (при аналогичной характеристике у контрольных немодифицированных составов 0.11–0.12).

Установлены зависимости приращения 28-суточной прочности на растяжение при изгибе и на сжатие, отнесенного к количеству введенного нанокремнезема, уменьшающиеся по степенной функции:

$$\Delta R_{\text{изг}}^{28} / [\text{SiO}_2] = A / [\text{SiO}_2]^z, A = 31,825, z = 0.884, R^2 = 0.9834$$

$$\Delta R_{\text{сж}}^{28} / [\text{SiO}_2] = A / [\text{SiO}_2]^z, A = 28.196, z = 0.714, R^2 = 0.9826$$

Микроструктурный анализ показал, что модифицированный цементный камень имеет более плотную структуру, включающую большее количество низкоосновных гидросиликатов кальция (рисунок 2 б), тогда как в неаддитивной цементной матрице больше высокощелочных гидросиликатов и присутствуют гексагональные пластины портландита (рисунок 2 а).



a)

b)

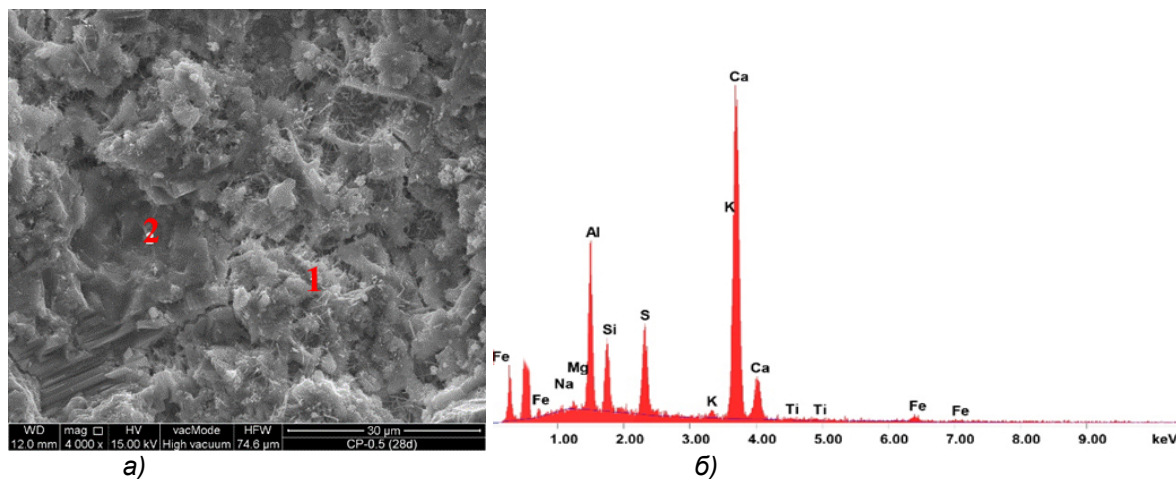
**Fig. 2 - Microstructure of samples: a) control, b) modified**

Liseitsev, Y.

Modified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements;  
 2024; *AlfaBuild*; **30** Article No 3001. doi: 10.57728/ALF.30.1

**Рис. 2 - Микроструктура образцов: а) контрольного, б) модифицированного**

В дополнение к растровой электронной микроскопии, энергодисперсионная спектроскопия описывает элементный состав формирующейся через 28 суток твердения цементной матрицы (рисунок 3). У модифицированного образца отмечаются волокнистые формы моносульфата алюмината кальция (1), который кристаллизуется на подложке из продуктов разложения AFt. Характерно также наличие слоя геля CSH на кристаллах портландита (2).



**Fig. 3 - Microstructure of the modified sample is hydrated forms of aluminosilicates and calcium silicates; b) EDS spectrum at point 1**

**Рис. 3 - Микроструктура модифицированного образца – гидратированные формы алюмосиликатов и силикатов кальция; б) спектр ЭДС в точке 1**

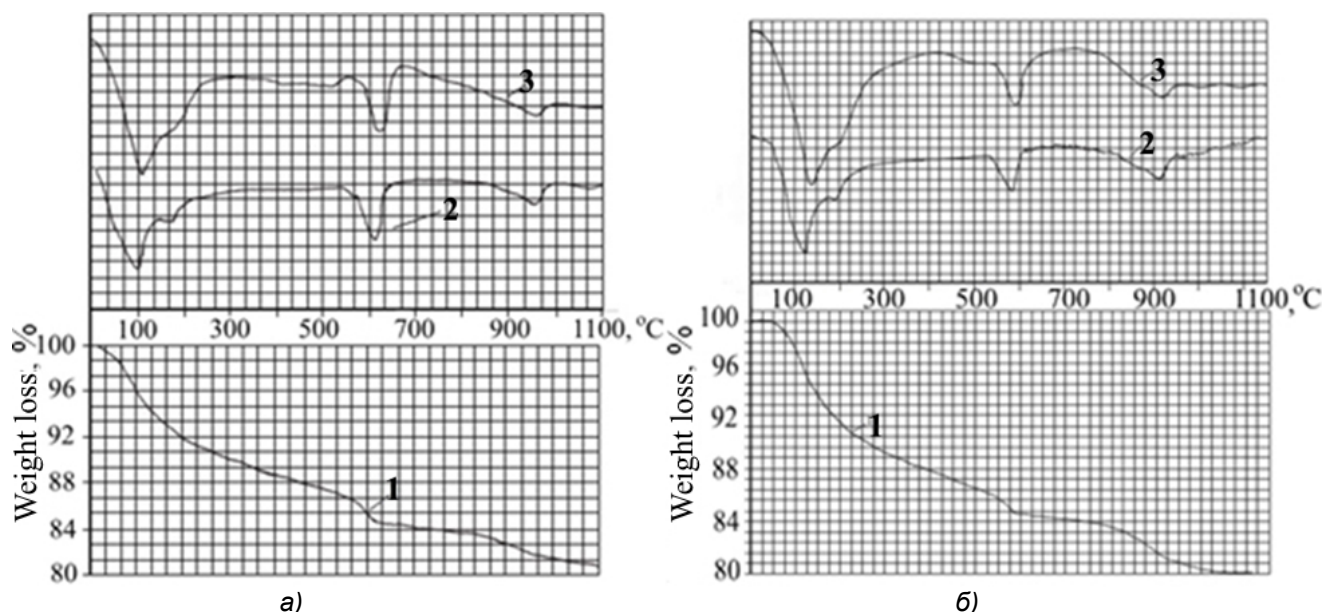
Эти различия в структуре можно объяснить:

1) вкладом пуццолановой реакции между частицами алюмосиликатов и  $\text{nano-SiO}_2$  с  $\text{Ca(OH)}_2$ , образующимся при гидратации алита, с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации;

2) появлением дополнительных центров кристаллизации частиц гидросиликата кальция за счет большой удельной поверхности наночастиц  $\text{SiO}_2$  и, соответственно, уменьшением конечного размера частиц новообразований и увеличением степени их полимеризации и объемной плотности их упаковки;

3) ролью наночастиц  $\text{SiO}_2$  в качестве микронаполнителя в мезо- и макропорах цементной матрицы. Повышение прочности при сжатии, уменьшение объема и среднего диаметра пор, и увеличение равномерности распределения диаметра пор происходит за счет изменения модифицированной структуры.

Выявленные результаты подтверждаются данными дифференциально-термического анализа. Температурные эффекты, как в модифицированной, так и в немодифицированной матрице, имеют схожие картины, отличаясь лишь различиями в гидратных фазах: при  $100-140^\circ\text{C}$  (гидросиликатные CSH и трисульфатные алюмоферритные AFt фазы),  $180^\circ\text{C}$  (гидроалюминат  $\text{C}_4\text{AH}_{19}$ ),  $600^\circ\text{C}$  ( $\text{Ca(OH)}_2$ ),  $750$  и  $780^\circ\text{C}$  ( $\text{CaCO}_3$ ) и  $940^\circ\text{C}$  (CSH) (рисунок 4).

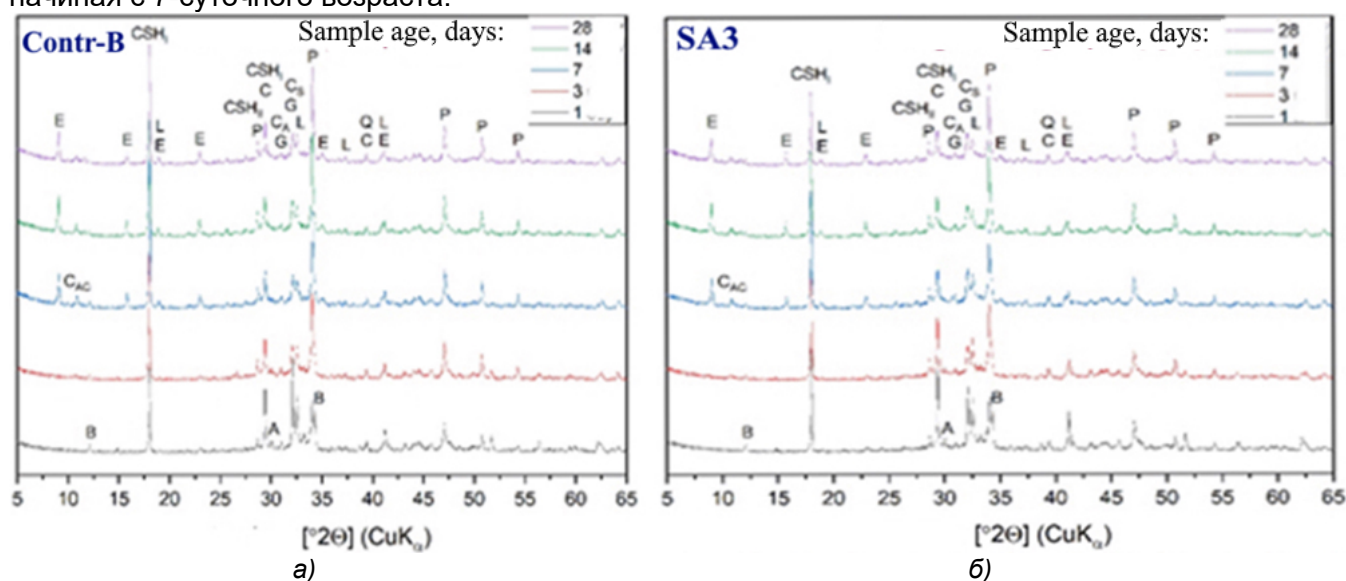


**Fig. 4 - DTA results of samples: a) control, b) modified. 1 - thermogravimetry, 2 - differential thermal analysis, 3 - differential scanning calorimetry**

**Рис. 4 - Результаты ДТА образцов: а) контрольного, б) модифицированного. 1 - термогравиметрия, 2- дифференциально-термический анализ, 3- дифференциальная сканирующая калориметрия**

Снижение площади эндотермического эффекта, характеризующего 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 в его составе портландита.

Рентгенофазовый анализ образцов (рисунок 5) также подтверждает не качественное, а количественное изменение микроструктуры (схожее для всех составов) в результате введения модификатора. Снижение видимых отражений гидроксида кальция свидетельствует о связывании его в новообразования второй генерации. Кристаллы портландита формируются на самой ранней стадии гидратации, о чем свидетельствуют отражения с межплоскостными расстояниями  $d = 4.90$ ;  $2.63 \text{ \AA}$  для суточных образцов. Окончание формирования кристаллов портландита отмечается для 14-суточных образцов. Кристаллы этtringита (пики с  $d = 9.72$ ;  $5.61 \text{ \AA}$ ) прослеживаются, начиная с 7-суточного возраста.



**Fig. 5 - X-ray pattern of the modified composite depending on age at the content of nano-SiO<sub>2</sub>: a) 0%; b) 3%; E – ettringite, P – portlandite, B – tetracalcium aluminoferrite (brownmillerite), L – belite**

Liseitsev, Y.

Modified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements;  
2024; *AlfaBuild*; 30 Article No 3001. doi: 10.57728/ALF.30.1



(Iarnite), C – calcite, Q – quartz, CSH(I) – low-basic calcium silicate hydrate, CSH(II) – high-basic calcium silicate hydrate, CAC – calcium hydrocarboaluminate, CA – calcium hydroaluminate, CS – calcium silicate

Рис. 5 - Рентгенограмма модифицированного композита в зависимости от возраста при содержании нано-SiO<sub>2</sub>: а) 0%; б) 3%; Е – этtringит, Р – портландит, В – четырехкальциевый алюмоферрит (браунмиллерит), L – белит (ларнит), С – кальцит, Q – кварц, CSH(I) – низкоосновный гидросиликат кальция, CSH(II) – высокоосновный гидросиликат кальция, CAC – гидрокарбоалюминат кальция, CA – гидроалюминат кальция, CS – силикат кальция

Таким образом, разработана широкая номенклатура КВ, в которых портландцемент ЦЕМ I 32.5Б замещен более чем на 30% алюмосиликатами, данные компоненты совместно измельчены в варио-планетарной мельнице до удельной поверхности 550 м<sup>2</sup>/кг. Составы композиционного вяжущего модифицированы нанодобавками кремнезема в виде золя и порошка в диапазоне 0.01–3%. Разработанные МКВ имеют высокий потенциал для применения в качестве вяжущей матрицы эффективных материалов для дорожных и аэродромных покрытий.

Управление структурообразованием современных материалов на макроуровне осуществлено с позиции трансдисциплинарности, в частности, с применением положений закона подобия, согласно которому проектирование композитов с заданными характеристиками, перспективно осуществлять с применением сырьевых компонентов, имеющих подобные деформационные показатели. В диссертации это было осуществлено выбором базальтовой фибры, которая имеет линейный коэффициент температурного расширения, схожий с аналогичной характеристикой цементного камня:  $8 \cdot 10^{-6}$  и  $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  соответственно.

Экспериментальные пропорции фибробетонов, запроектированные на основе разработанных МКВ, с применением базальтовой фибры в количестве 1.5% по массе вяжущего, перечислены в таблице 1.

Table 1. Compositions of modified basalt fiber concrete  
Таблица 1. Составы модифицированных базальтофибробетонов

№ состава*	Расход, кг на 1 м <sup>3</sup> , кг						
	ПЦ**	АСК**	SiO <sub>2</sub> ***	Вода	СП**	Песок	Фибра
Contr-AF	462	-	-	185	-	1387	6.9
Contr-BF	462	-	-	185	5	1387	6.9
Contr-CF	323	139	-	185	5	1387	6.9
SAF001	323	139	0.397 (0.05)	182	2	1387	6.9
SAF005	323	139	1.99 (0.23)	182	2	1387	6.9
SAF01	323	139	3.97 (0.46)	180	2	1387	6.9
SAF025	322	139	9.93 (1.16)	173	3	1387	6.9
SAF05	321	139	19.87 (2.31)	163	4	1387	6.9
SAF1	329	139	39.73 (4.62)	147	5	1387	6.9
SAF2	315	139	79.46 (9.24)	110	7	1387	6.9
SAF3	310	139	119.20 (13.86)	73	10	1387	6.9
SACF2	315	139	79.46 (9.24)	110	7	1387	6.9
SACF3	310	139	119.20 (13.86)	73	10	1387	6.9
PAF001	323	139	0.05	184	2	1387	6.9
PAF005	323	139	0.25	180	2	1387	6.9
PAF01	323	139	0.46	180	2	1387	6.9
PAF025	322	139	1.16	173	3	1387	6.9
PAF05	321	139	2.33	163	4	1387	6.9
PAF1	329	139	4.62	182	5	1387	6.9
PAF3	310	139	13.86	179	10	1387	6.9
PACF2	315	139	9.24	181	7	1387	6.9
PACF3	310	139	13.86	179	10	1387	6.9
LCF001	365	-	0.397 (0.05)	110	5	1387	6.9
LCF1	360	-	39.73 (4.62)	73	7	1387	6.9
LCF3	314	-	119.20 (13.86)	55	7	1387	6.9

Примечание: \*LCF – малоцементный; SAF – золь+АСК+фибра; PAF – нанопорошок+АСК+фибра; SACF и PACF – комплексная добавка SiO<sub>2</sub> + СП; \*\*ПЦ –

Liseitsev, Y.

Modified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements;  
2024; AlfaBuild; 30 Article No 3001. doi: 10.57728/ALF.30.1



портландцемент, АСК - алюмосиликатный компонент; \*\*\*Для составов типа SAF и LCF в столбце SiO<sub>2</sub> указан расход золя, в скобках - расход твердых наночастиц SiO<sub>2</sub> в составе золя

Использование фибры закономерно приводит к росту прочности на растяжение при изгибе во всех возрастах твердения (до 177%) (таблица 2). Это объясняется повышенной адгезией между цементным камнем и микрофиброй, подобранной в соответствии с законом подобия. В результате усиливается напряжение сдвига между микрофиброй и цементным камнем. Отмечается рост приращения прочности на сжатие с возрастом, что объясняется уплотнением цементной матрицы в результате формирования новообразований второй генерации.

Комплексный эффект на двух разномасштабных уровнях (нано-SiO<sub>2</sub> и микрофибра) с позиции микромеханики композиционных сред объясняется тем, что наночастицы SiO<sub>2</sub> повышают плотность упаковки частиц плотной фазы CSH-геля, вследствие чего растут механические свойства фаз – твердость и модуль упругости (подтверждено приращением прочности при изгибе и сжатии).





**Table 2. Tensile strength in bending and compression of basalt fiber reinforced concrete modified with sol**  
**Таблица 2. Прочность на растяжение при изгибе и на сжатие базальтофибробетона, модифицированного золом**

Свойства	Contr-AF	Contr-BF	Contr-CF	SAF001	SAF005	SAF01	SAF025	SAF05	SAF1	SAF2	SAF3	SACF2	SACF3
Прочность при сжатии на 1 сутки, МПа	8.0	8.2	8.6	9.7 (+18%)	10.4 (+27%)	11.1 (+35%)	11.9 (+45%)	12.9 (+57%)	13.5 (+66%)	15.5 (+89%)	17.3 (+113%)	16.8 (+105%)	18.0 (+120%)
$\Delta R_{сж}^1 / SiO_2$	-	-	-	1800 %	540%	350%	180%	104%	66 %	45 %	30 %	43%	38%
$R_{сж}^1 / R_{сж}^{28}$	0.24	0.24	0.24	0.26	0.27	0.28	0.28	0.30	0.31	0.33	0.36	0.35	0.35
Прочность при сжатии на 7 сутки, МПа	18.1	19.5	20.2	21.9 (+12%)	22.4 (+15%)	22.7 (+17%)	23.3 (+19%)	23.5 (+21%)	23.8 (+22%)	26.0 (+33%)	30.1 (+54%)	27.3 (+40%)	30.9 (+58%)
$\Delta R_{сж}^7 / SiO_2$	-	-	-	1200 %	300%	170%	78%	42%	22 %	17 %	27 %	20%	17%
Прочность при сжатии на 28 сутки, МПа	33.1	34.0	35.9	37.3 (+10%)	38.8 (+14%)	40.3 (+19%)	41.8 (+23%)	42.3 (+24%)	44.2 (+30%)	46.7 (+37%)	48.4 (+42%)	48.1 (+41%)	51.3 (+51%)
$\Delta R_{сж}^{28} / SiO_2$	-	-	-	1000 %	280%	190%	92%	48%	30 %	19 %	14 %	20 %	17 %
Прочность при изгибе на 1 сутки, МПа	1.2	1.3	1.4	1.7 (+31 %)	1.8 (+38%)	1.9 (+46%)	2.1 (+62%)	2.3 (+77%)	2.6 (+100%)	2.7 (+108 %)	3.0 (+131%)	2.9 (+123%)	3.6 (+177%)
$\Delta R_{из}^1 / SiO_2$	-	-	-	3100 %	760%	460%	248%	154%	100 %	54 %	44 %	61%	59%
$R_{из} / R_{сж, 1 сут.}$	0.15	0.16	0.16	0.19	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.17	0.17	0.20
$R_{из}^1 / R_{из}^{28}$	0.15	0.16	0.16	0.19	0.19	0.19	0.20	0.22	0.24	0.24	0.25	0.23	0.27
Прочность при изгибе на 7 сутки, МПа	3.0	3.1	3.3	3.6 (+16 %)	3.7 (+19 %)	3.9 (+26 %)	4.0 (+29%)	4.2 (+35%)	4.4 (+42%)	4.5 (+45%)	5.2 (+68% )	5.1 (+65% )	5.4 (+74% )
$\Delta R_{из}^7 / SiO_2$	-	-	-	1600 %	380%	260%	116%	70%	42%	22%	34%	33%	25%
$R_{из} / R_{сж, 7 сут.}$	0.17	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17	0.19	0.17
Прочность при изгибе на 28 сутки, МПа	8.0	8.2	8.7	8.9 (+9%)	9.4 (+15%)	9.9 (+21%)	10.3 (+26%)	10.6 (+29%)	10.9 (+33%)	11.4 (+39%)	12.0 (+46%)	12.7 (+55%)	13.3 (+62%)
$\Delta R_{из}^{28} / SiO_2$	-	-	-	900 %	300%	210%	104%	58%	33%	20 %	15%	18%	21 %
$F_{из} / F_{сж, 28 сут.}$	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25	0.26	0.26

\*Сравнение приводится с контрольным составом Contr-BF, включающим цемент и суперпластификатор

Liseitsev, Y.

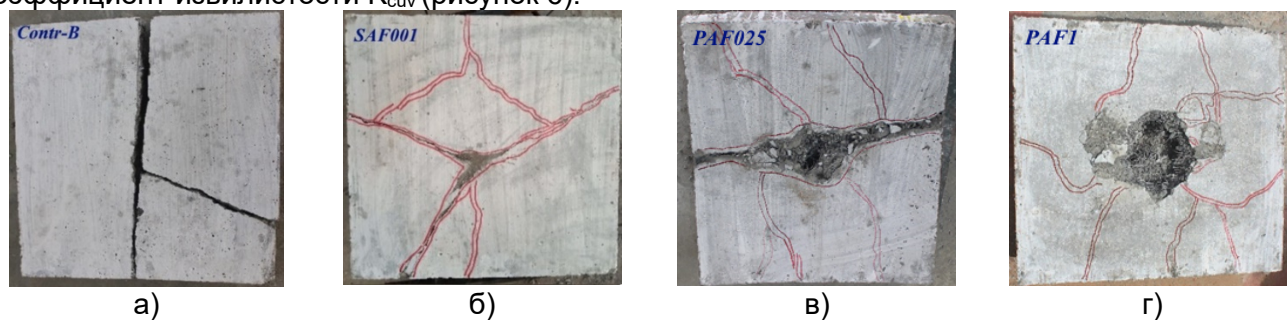
Modified fiber-reinforced concrete for road and airfield pavements;  
 2024; *AlfaBuild*; 30 Article No 3001. doi: 10.57728/ALF.30.1

Эффект приращения прочности на растяжение при изгибе и на сжатие, отнесенной к содержанию кремнеземного модификатора, уменьшался по степенным зависимостям, которые можно аппроксимировать с высоким  $R^2$  для цементных композитов, модифицированных золев и базальтовой микрофиброй, для 28 суток:

$$\Delta R_{изг}^{28} / [SiO_2] = A / [SiO_2]^z, A = 28.701, z = 0.75, R^2 = 0.9703$$

$$\Delta R_{сж}^{28} / [SiO_2] = A / [SiO_2]^z, A = 24.480, z = 0.79, R^2 = 0.9759$$

Испытания на ударную выносливость показали, что с возрастанием дозировки  $SiO_2$  изменялся характер разрушения композитов: уже при содержании  $SiO_2$  в количестве 0.01 мас. % (и выше) увеличилось количество трещин перед разрушением, уменьшилась их ширина и возрос коэффициент извилистости  $K_{сиз}$  (рисунок 6).



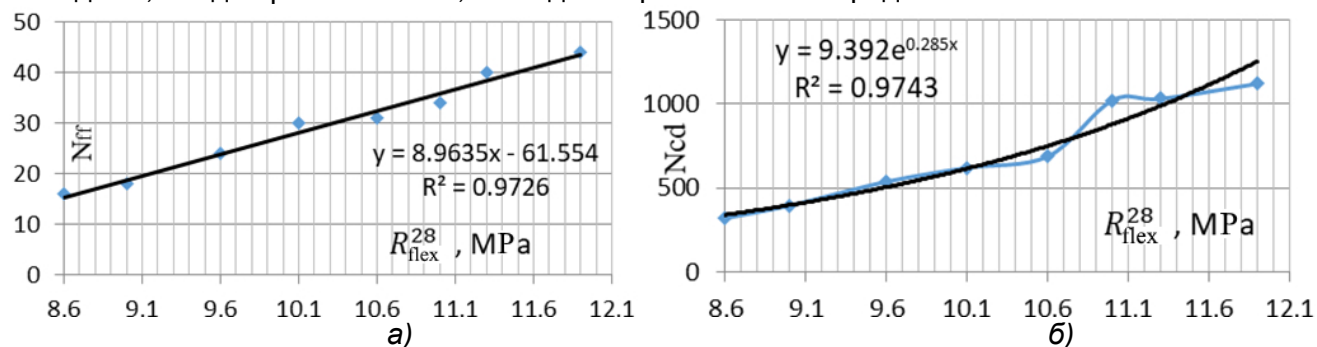
**Fig. 6 - Comparison of the nature of the destruction of panels: a) without nanosilica; b) 0.01%  $SiO_2$  sol; c) 0.25%  $SiO_2$  nanopowder; d) 1%  $SiO_2$  nanopowder**

**Рис. 6 - Сравнение характера разрушения панелей: а) без нанокремнезема; б) 0.01% золя  $SiO_2$ ; в) 0.25% нанопорошка  $SiO_2$ ; г) 1% нанопорошка  $SiO_2$**

Количество ударов до начала трещинообразования  $N_{ff}$  и разрушения образца  $N_{cd}$ , а также коэффициент ударной вязкости  $\mu$ , являющийся отношением между ними, модифицированных цементных композитов в возрасте 28 суток относительно контрольных образцов возрастали с увеличением содержания кремнезема.

Помимо влияния фибры на ударную выносливость, вклад вносят частицы  $SiO_2$ , которые приводят: 1) к ускорению гидратации  $C_3S$  и к появлению дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция за счет пуццолановой реакции, увеличению объема CSH-геля и снижению пористости цементного композита; 2) ускорению полимеризации кремнекислородных тетраэдров, повышению степени их полимеризации, снижению отношения  $Ca/Si$  в фазах гидросиликатного геля, формированию более упорядоченной структуры геля с повышенной долей HD фазы с объемной плотностью упаковки гранул  $\eta = 0.74$

Подобие механизмов повышения механических характеристик и показателей ударной выносливости подтверждают найденные зависимости между ( $N_{cd}$ ,  $N_{ff}$ ) и ( $R_{изг}^{28}$ ) (рисунок 7). Полученные выводы подтверждаются экспериментальными результатами коэффициента интенсивности предельного напряжения (КИН), определявшегося двумя взаимодополняющими методами, как для равновесного, так и для неравновесного предельного состояния.



**Fig. 7 - Dependencies ( $N_{cd}$ ,  $N_{ff}$ ) - ( $R_{flex}^{28}$  sol and fiber), approximation trend lines and statistical indicators  $R^2$  (modification with sol and fiber)**

**Рис. 7 - Зависимости ( $N_{cd}$ ,  $N_{ff}$ ) - ( $R_{изг}^{28}$ ), аппроксимационные линии трендов и статистические показатели  $R^2$  (модификация золев и фиброй)**



Показатель средней размерности открытых капиллярных пор  $\lambda$  и показатель однородности размеров открытых капиллярных пор  $\alpha$ , вычисленные по результатам кинетики водонасыщения  $W_t(t) = W_{\max} \left[ 1 - e^{-(\lambda_1 t)^\alpha} \right]$ , изменялись в зависимости от содержания  $\text{SiO}_2$ ; где  $W_{\max}$  - максимальное изменение массы бетона в результате водопоглощения. Показатель  $\lambda$  уменьшался, а показатель  $\alpha$  увеличивался при росте количества введенного нанокремнезема, что соответствовало уменьшению среднего диаметра пор и повышению однородности дифференциального распределения объема пор по диаметру. Установлены следующие значения параметров  $\lambda$  и  $\alpha$  для разных дозировок диоксида кремния:

Contr-B - контрольный образец,  $W_{\max} = 6.28 \%$ ,  $\lambda = 0.200$ ,  $\alpha = 0.30$ ;

SAF001 -  $\text{SiO}_2 = 0.01 \%$ ,  $W_{\max} = 6.27 \%$ ,  $\lambda = 0.239$ ,  $\alpha = 0.469$ ;

SAF1 -  $\text{SiO}_2 = 1 \%$ ,  $W_{\max} = 5.72 \%$ ,  $\lambda = 0.080$ ,  $\alpha = 0.706$ ;

SAF2 -  $\text{SiO}_2 = 2 \%$ ,  $W_{\max} = 5.41 \%$ ,  $\lambda = 0.054$ ,  $\alpha = 0.824$ ;

SAF3 -  $\text{SiO}_2 = 3 \%$ ,  $W_{\max} = 5.10 \%$ ,  $\lambda = 0.050$ ,  $\alpha = 0.870$ ;

SACF3 -  $\text{SiO}_2 = 3 \%$ ,  $W_{\max} = 4.88 \%$ ,  $\lambda = 0.040$ ,  $\alpha = 0.890$ .

Снижение характеристик пористости и водопоглощения положительно сказывается на увеличении морозостойкости. При дозировке нанокремнезема в количестве 0.25 мас. % число пройденных циклов повысилось от 200 до 300.

**Table 3. Tensile strength in bending and compression of basalt fiber reinforced concrete modified with sol**

**Таблица 3. Прочность на растяжение при изгибе и на сжатие базальтофибробетона, модифицированного золе**

№ состава	700°C	900°C	1100°C
Contr-A	4	3	1
Contr-B	8	6	2
Contr-C	5	4	0
Contr-AF	7	6	1
SAF001	6	5	2
SAF1	11	9	4
SAF2	13	10	6
SAF3	16	13	8
PAF001	7	5	3
PAF1	10	9	4
PAF2	14	10	5
PAF3	15	14	9
LC1	9	8	4
LC2	12	9	5
LC3	15	12	7
LC4	15	13	8

Важной эксплуатационной характеристикой для покрытий аэродромов и космодромов является термостойкость (таблица 3). Она растет за счет микрофибры, но более сильное влияние оказывает нанокремнезем. Причем по зависимости термостойкости от дозировки  $\text{SiO}_2$  видно, что дальнейший рост количества кремнезема приведет к значительному повышению показателей термической стойкости.

Таким образом, разработана широкая номенклатура износостойких и ударопрочных базальтофибробетонных, модифицированных гидротермальным золе и нанопорошком диоксида кремния. Комплексный эффект на двух разномасштабных уровнях (нанокремнезем и микрофибра) положительно влияет на повышение прочностных свойств и характеристик долговечности (водопоглощение, морозостойкость, истираемость, термостойкость), что позволяет применять разработанные композиты для особо ответственных дорожных покрытий, в т.ч. аэродромов и космодромов.

Согласно [32], полученные цементные композиты на плотных заполнителях относятся к высокопрочным, тяжелым, конструкционным, быстротвердеющим, с плотной структурой, твердеющим в естественных условиях, с высокой морозостойкостью.



## 4 Conclusions / Выводы

1. Дополнены теоретические положения о методах получения эффективных фибробетонов на разработанном модифицированном вяжущем, с упруго-вязкой микроструктурой (модуль упругости 40.3 ГПа, коэффициент Пуассона 0.20) и высокими эксплуатационными характеристиками (марки: G1 (истираемость), W18 (водонепроницаемость), F2300 (морозостойкость), T<sub>15</sub>-T<sub>15</sub> (термостойкость для классов по предельно допустимой температуре применения И9-И11)), что позволяет использовать композиты для дорожных, аэродромных и космодромных сооружений.

2. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение базальтофибробетонов на модифицированном композиционном вяжущем, заключающиеся в создании сверхвысокоплотной упаковки гидратных новообразований на наноуровне с применением новых нетрадиционных сырьевых компонентов (алюмосиликатов, полученных по разработанной технологии, а также гидротермального нанокремнезема). В результате МКВ вместе с выбранной в соответствии с законом подобия базальтовой микрофиброй обеспечивает рост прочности на растяжение при изгибе фибробетонов в 4 раза, а ударной выносливости – до 9 раз. Эффективная работа при динамических и ударных воздействиях подтверждается отношением прочностей на растяжение при изгибе и на сжатие, равным 0.25. При этом обеспечивается эффективность структурообразования на ранних этапах (прочность при изгибе в 1 сутки равна 3.6 МПа).

3. Предложена феноменологическая модель структурообразования цементобетонных дорожных покрытий на МКВ, основанная на комплексном эффекте на двух разномасштабных уровнях (нанокремнезем и микрофибра), что положительно влияет на повышение прочностных свойств и характеристик долговечности. Получены степенные зависимости, аппроксимированные с высокой достоверностью и сходимостью, приращения прочности на растяжение при изгибе и на сжатие, а также показателей трещиностойкости и ударной выносливости фибробетона от пропорций кремнеземсодержащих микро- и нанодобавок, что позволило запроектировать технологические параметры производства МКВ и базальтофибробетонов на его основе с заданными высокими значениями физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик при минимальных затратах.

4. Определена энергоэффективная технология (53 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup>) получения алюмосиликатного компонента путем 5-ступенчатого обогащения золошлаковой смеси, включающего дезинтеграцию, флотацию, двухстадийную магнитную сепарацию и сушку. Полученные алюмосиликаты способны при замещении цемента более 30 мас. % влиять на структурообразование МКВ, повышая физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики цементобетона.

## References

- 1 Mosaberpanah, M.A. and Eren, O. (2017) Statistical Models for Mechanical Properties of UHPC Using Response Surface Methodology. *Computers and Concrete*. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.6.667>.
- 2 García Calvo, J.L., Pérez, G., Carballosa, P., Erkizia, E., Gaitero, J.J. and Guerrero, A. (2017) Development of Ultra-High Performance Concretes with Self-Healing Micro/Nano-Additions. *Construction and Building Materials*, **138**, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.015>.
- 3 Ganesh, P. and Murthy, A.R. (2019) Tensile Behaviour and Durability Aspects of Sustainable Ultra-High Performance Concrete Incorporated with GGBS as Cementitious Material. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.240>.
- 4 Azreen, N.M., Rashid, R.S.M., Mugahed Amran, Y.H., Voo, Y.L., Haniza, M., Hairie, M., Alyousef, R. and Alabduljabbar, H. (2020) Simulation of Ultra-High-Performance Concrete Mixed with Hematite and Barite Aggregates Using Monte Carlo for Dry Cask Storage. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **263**, 120161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120161>.
- 5 Fediuk, R., Mochalov, A. and Timokhin, R. (2018) Review of Methods for Activation of Binder and Concrete Mixes. *AIMS Materials Science*, **5**. <https://doi.org/10.3934/mat.2018.5.916>.
- 6 Luan, C., Wang, J., Gao, J., Wang, J., Du, P., Zhou, Z., Huang, Y. and Du, S. (2022) Changes in Fractal Dimension and Durability of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with Silica Fume



Content. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **22**, 123. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00443-3>.

- 7 Van Tuan, N., Ye, G., Van Breugel, K., Fraaij, A.L.A. and Bui, D.D. (2011) The Study of Using Rice Husk Ash to Produce Ultra High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046>.
- 8 Scrivener, K.L., Juilland, P. and Monteiro, P.J.M. (2015) Advances in Understanding Hydration of Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, **78**, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025>.
- 9 He, Z. hai, Du, S. gui and Chen, D. (2018) Microstructure of Ultra High Performance Concrete Containing Lithium Slag. *Journal of Hazardous Materials*, **353**, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.063>.
- 10 Jung, M., Lee, Y. soon, Hong, S.G. and Moon, J. (2020) Carbon Nanotubes (CNTs) in Ultra-High Performance Concrete (UHPC): Dispersion, Mechanical Properties, and Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness (SE). *Cement and Concrete Research*, Elsevier, **131**, 106017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106017>.
- 11 Abid, S.R., Gunasekaran, M., Ali, S.H., Kadhum, A.L., Al-Gasham, T.S., Fediuk, R., Vatin, N. and Karelina, M. (2021) Impact Performance of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete against Repeated Drop Weight Impact. *Crystals*, **11**, 91. <https://doi.org/10.3390/cryst11020091>.
- 12 Fediuk, R.S., Ibragimov, R.A., Lesovik, V.S., Pak, A.A., Krylov, V.V., Poleschuk, M.M., Stoyushko, N.Y. and Gladkova, N.A. (2018) Processing Equipment for Grinding of Building Powders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042029>.
- 13 Xie, T., Fang, C., Mohamad Ali, M.S. and Visintin, P. (2018) Characterizations of Autogenous and Drying Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete (UHPC): An Experimental Study. *Cement and Concrete Composites*, **91**, 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.009>.
- 14 Fediuk, R., Mugahed Amran, Y.H., Mosaberpanah, M.A., Danish, A., El-Zeadani, M., Klyuev, S. V. and Vatin, N. (2020) A Critical Review on the Properties and Applications of Sulfur-Based Concrete. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma13214712>.
- 15 Tolstoy, A., Lesovik, V., Fediuk, R., Amran, M., Gunasekaran, M., Vatin, N. and Vasilev, Y. (2020) Production of Greener High-Strength Concrete Using Russian Quartz Sandstone Mine Waste Aggregates. *Materials*, **13**, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13235575>.
- 16 Provete Vincler, J., Sanchez, T., Turgeon, V., Conciatori, D. and Sorelli, L. (2019) A Modified Accelerated Chloride Migration Tests for UHPC and UHPFRC with PVA and Steel Fibers. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.12.006>.
- 17 Park, S., Wu, S., Liu, Z. and Pyo, S. (2021) The Role of Supplementary Cementitious Materials (SCMs) in Ultra High Performance Concrete (UHPC): A Review. *Materials*, **14**, 1472. <https://doi.org/10.3390/ma14061472>.
- 18 Semenov, P., Uzunian, A., Davidenko, A. and Al., E. (2007) First Study of Radiation Hardness of Lead Tungstate Crystals at Low Temperatures. *Nuclear instruments & methods in physics research section A: Accelerators spectrometers detectors and associated equipment*, **582**, 575–580. <https://doi.org/DOI: 10.1016/j.nima.2007.08.178>.
- 19 Farzad, M., Shafieifar, M. and Azizinamini, A. (2019) Experimental and Numerical Study on Bond Strength between Conventional Concrete and Ultra High-Performance Concrete (UHPC). *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.030>.
- 20 Maddalena, R., Hall, C. and Hamilton, A. (2019) Effect of Silica Particle Size on the Formation of Calcium Silicate Hydrate [C-S-H] Using Thermal Analysis. *Thermochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.09.003>.
- 21 Zhang, M.H., Islam, J. and Peethamparan, S. (2012) Use of Nano-Silica to Increase Early Strength and Reduce Setting Time of Concretes with High Volumes of Slag. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.005>.
- 22 Walker, R. and Pavia, S. (2014) Influence of the Type of Binder on the Properties of Lime-Hemp Concrete. *Construction and Building Research*, Springer Netherlands, Dordrecht, 505–514. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7790-3\\_61](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7790-3_61).
- 23 Farzadnia, N., Noorvand, H., Yasin, A.M. and Aziz, F.N.A. (2015) The Effect of Nano Silica on Short Term Drying Shrinkage of POFA Cement Mortars. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.132>.
- 24 Hamada, H.M., Thomas, B.S., Yahaya, F.M., Muthusamy, K., Yang, J., Abdalla, J.A. and Hawileh,

Kirsanov, M.; Vorobiev, I.; Serdjuks D.; Buka-Vaivade K.

Bean pod epicarp ash concrete;

2023; *AlfaBuild*; **00** Article No 0000. doi: 10.57728/ALF.00.0



- R.A. (2021) Sustainable Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material: A Comprehensive Review. *Journal of Building Engineering*, **40**. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102286>.
- 25 Jiang, D., Li, X., Lv, Y., Li, C., Jiang, W., Liu, Z., Xu, J., Zhou, Y. and Dan, J. (2021) Autogenous Shrinkage and Hydration Property of Alkali Activated Slag Pastes Containing Superabsorbent Polymer. *Cement and Concrete Research*, **149**. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106581>.
- 26 Almeida, F.C.R. and Klemm, A.J. (2018) Effect of GGBS on Water Absorption Capacity and Stability of Superabsorbent Polymers Partially Crosslinked with Alkalis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002511](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002511).
- 27 Sun, B., Wu, H., Song, W., Li, Z. and Yu, J. (2019) Design Methodology and Mechanical Properties of Superabsorbent Polymer (SAP) Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials*, **204**, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.206>.
- 28 Liu, R., Sun, Z., Ding, Q., Chen, P. and Chen, K. (2017) Mitigation of Early-Age Cracking of Concrete Based on a New Gel-Type Superabsorbent Polymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001994](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001994).
- 29 Fediuk, R., Timokhin, R., Mochalov, A., Otsokov, K. and Lashina, I. (2019) Performance Properties of High-Density Impermeable Cementitious Paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002633](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002633).
- 30 Potapov, V., Efimenko, Y., Fediuk, R., Gorev, D., Kozin, A. and Liseitsev, Y. (2021) Modification of Cement Composites with Hydrothermal Nano-SiO<sub>2</sub>. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **33**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003964](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003964).
- 31 Yang, J., Liu, L., Liao, Q., Wu, J., Li, J. and Zhang, L. (2019) Effect of Superabsorbent Polymers on the Drying and Autogenous Shrinkage Properties of Self-Leveling Mortar. *Construction and Building Materials*, **201**, 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.197>.
- 32 (2013) Russian Standard GOST 25192-2012 Concrete. Classification and General Technical Requirements. Mocsow. <https://docs.cntd.ru/document/1200100938>