

# Влияние метакаолина на свойства цементных систем

<sup>1</sup>**РАХИМОВА Галия Мухамедиевна**, к.т.н., доцент, g.rakhimova@kstu.kz,

<sup>2</sup>**ИЛЬИНА Лилия Владимировна**, д.т.н., профессор, l.ilina@sibstrin.ru,

<sup>1\*</sup>**АЙСАНОВА Мадина Акпановна**, докторант, madinochka222@mail.ru,

<sup>1</sup>**РАХИМОВ Асхат Муратович**, PhD, старший преподаватель, rakhimov.askhat@gmail.com,

<sup>1</sup>**ТОИМБАЕВА Бакыт Мухамедиевна**, магистр, старший преподаватель, toimbayeva@mail.ru,

<sup>1</sup>НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Высокодисперсные тонкомолотые минеральные добавки, содержащие аморфный  $\text{SiO}_2$ , успешно применяют в цементных бетонах различного назначения [1]. Их использование обусловлено повышением долговечности, прочности, водонепроницаемости. Одним из наиболее известных и широко применяемых пуццолановых модификаторов является микрокремнезем. Микрокремнезем получают из отхода производства кремнийсодержащих сплавов, содержащих до 95% чистого аморфного кремнезема. У микрокремнезема имеется такой недостаток, как высокая водопотребность. Для компенсации требуется введение большого количества суперпластификатора. В последние годы в качестве высокоэффективной пуццолановой добавки все большую популярность в мире получает высокоактивный метакаолин (МТК) [2]. Это искусственный экологически чистый материал, производимый из чистых каолинитов. Растущая популярность МТК обусловлена не модой на новинки, а объективными преимуществами этого материала. Целью данной работы являются: изучение использования метакаолина в качестве добавки при производстве цементобетонных покрытий, определение основных механических свойств цементных балок на основе активированного метакаолина. Научные методы исследования в работе – анализ, наблюдение, эксперимент, моделирование.

**Ключевые слова:** метакаолин, дорожный бетон, дорожное покрытие, цементобетон, наполнитель.

**Введение.** Метакаолин – минеральная пуццолановая добавка, которая заметно улучшает свойства гидравлических цементных растворов, бетона и аналогичных продуктов. МТК легко перемешивается и обеспечивает мягкую пластичную консистенцию, с которой удобно работать. По причине оптимального распределения размеров частиц не происходит увеличения водопотребности смеси.

Метакаолин показал свое преимущество в применении, где необходимы отличные показатели прочности, уплотнения и стойкости к окружающим факторам [3].

Добавка из метакаолина производится путем кальцинирования концентрированного каолина. Добавка в основном состоит из минерала каолинита – слоистый силикатный минерал. Между слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в пропорции 1:2 вода, находящаяся между слоями, может быть испарена путем термического нагрева, в процессе кальцинирования. Таким образом каолин активируется. В процессе гидратации портландцемент набирает

до 25% гидроксида кальция (гашеной извести). Этот побочный щелочной продукт является очень растворимым и в первую очередь подвергается атаке и растворяется в присутствии кислот или сульфатов.

Особенностью МТК является его способность связывать большое количество свободной извести в форме стабильных кристаллогидратов. Скорость и количество этой реакции может регулироваться соответствующими химическими методами. Степень реактивности метакаолина может быть определена как средняя [4]. Вместе с известью и водой усадка происходит в течение примерно 12 часов.

Химический состав добавки представлен в таблице 1.

В таблице 2 представлены основные физические характеристики добавки.

В научно-исследовательской лаборатории была исследована микроструктура метакаолина. На рисунке 1 изображены фотографии микро-

№ п/п	Химическое соединение	Процентное содержание, %
1	SiO <sub>2</sub>	52-54
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40-43
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<2,5
4	TiO <sub>2</sub>	<1,0
5	CaO	<0,5
6	MgO	<0,4
7	Na <sub>2</sub> O	<0,1
8	K <sub>2</sub> O	<2,0

№ п/п	Физические характеристики	Показатель
1	Удельная плотность	2,6 кг/см <sup>3</sup>
2	Распределение частиц d <sub>50</sub> d <sub>95</sub>	3,4-4,5 микрон 12-18 микрон
3	Удельная поверхность (Blaine)	23000 см <sup>2</sup> /г
4	Удельная поверхность (ВЕТ)	18 м <sup>2</sup> /г
5	Цвет	Кремовый
6	Белизна (Dr. Lange)	67
7	Насыпная плотность в свободном падении	0,32-0,37 г/см <sup>3</sup>
8	Насыпная плотность в пресованном виде	0,45-0,52 г/см <sup>3</sup>

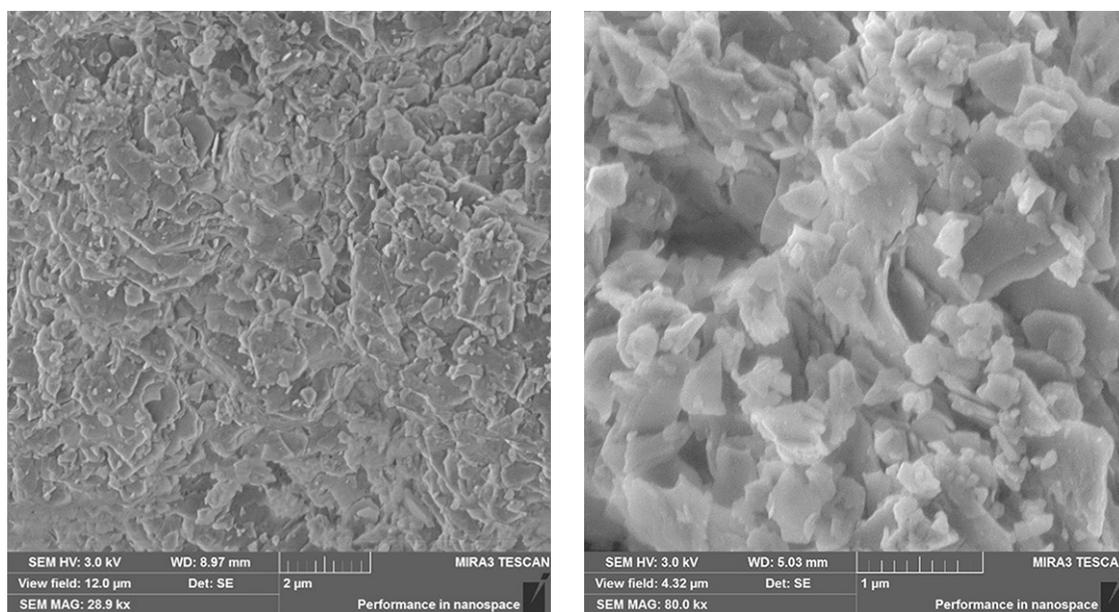


Рисунок 1 – Микроструктура метакаолина

структуры МТК, проведенные на растровом микроскопе Miraj Tescan.

Как показывают снимки, структура образца – слоистая.

Из-за сильной зарядки частиц (несмотря на предварительное напыление слоем углерода) ис-

следование проводили при небольшом ускоряющем напряжении (HV 3 kV). В основном, снимки были сделаны с применением детектора вторичных электронов (SE). Изображение на фото получено как с SE детектором, так и с BSE (детектор обратно рассеянных электронов), показывающим

композиционный контраст. Светлые участки на правом изображении содержат более тяжелые элементы по сравнению с основной матрицей. Как показал спектр рентгеноспектрального анализа, в этих участках (светлых) наряду с указанными элементами обнаруживается цирконий.

Для начала была рассмотрена способность взаимодействия метаксаолина в цементных системах. Для этого были определены основные 4 состава:

- 1) Контрольный образец цементных балок без добавки;
- 2) Образцы с использованием 5% метаксаолина от массы цемента;
- 3) Образцы с использованием 10% метаксаолина от массы цемента;
- 4) Образцы с использованием 15% метаксаолина от массы цемента;

Для этого были перемешаны сухие материалы (песок и цемент), далее добавлена вода. На рисунках 2, 3 показан процесс замешивания цементных балок.

Для замешивания образцов с 5-процентным содержанием метаксаолина были использованы следующие пропорции [5, 6]:

1. 1500 грамм песка;
2. 475 грамм цемента М400;
3. 200 мл воды;
4. 25 грамм метаксаолина.

На рисунке 4 изображен процесс виброобработки цементных балок на вибростоле для равномерного распределения цементного теста в форме.

Далее была проведена распалубка и образцы были помещены во влажную среду. На третий день были проведены первые испытания на прочность при изгибе и на сжатие. Испытания проводились на сертифицированном оборудовании и прессах (рисунок 5).

В таблице 3 представлены результаты испытаний на 3 и 28 сутки с добавлением метаксаолина 5% и без добавки.

В срезе можно увидеть внешнюю структуру



Рисунок 2 – Процесс замешивания цементного теста



Рисунок 3 – Процесс перемешивания в бетономесительной машине



Рисунок 4 – Процесс виброобработки цементных балок

цементных балок с добавкой и без. Срезы представлены на рисунке 6.

Далее были исследованы новые составы с 10%

и 15% содержанием метаксаолина. В таблице 4 представлены результаты испытаний.

Далее была изучена микроструктура добавки



а



б

Рисунок 5 – Сертифицированное оборудование для определения прочности при изгибе и сжатии (а) – Машина для статических испытаний материалов МИИ-100, б) – Пресс гидравлический ПГИ-500)

Таблица 3 – Результаты проведенных испытаний на прочности при изгибе и сжатии

Обозначение вида цемента	Предел прочности, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )			
	При изгибе в возрасте, сут.		При сжатии в возрасте, сут.	
	3	28	3	28
ПЦ400Д20	56,0	120	204,2	410,2
ПЦ400Д20+5%добавка	67,2	122	233,9	502,0



Рисунок 6 – Скол цементных балок с добавкой и без добавки

в цементных балках. Были взяты для сравнения 2 образца: контрольный образец без добавки и образец с 15% содержанием добавки от массы цемента.

Образцы были закреплены на алюминиевых «столиках» с помощью проводящего углеродного скотча. Перед исследованием на образцы наносили слой углерода для уменьшения зарядки поверхности (поскольку образцы непроводящие). Изображения получали с применением детектора вторичных электронов (SE детектор) при ускоряющем напряжении 4 кВ.

Изображения с растрового микроскопа Miraj Tescan представлены на рисунке 7.

На рисунке 8 показана микроструктура цементных балок в сколе с добавкой метаксаолина.

Поверхность образца без добавок содержит как более плотные участки, так и более рыхлые. Рыхлые участки имеют преимущественно игольчатую, сетчатую микроструктуру.

Поверхность образца с добавкой – более плотная, однако также состоит из участков разной плотности. Рыхлые участки имеют зернистую или слоистую структуру.

**Научные результаты.** Результаты исследования показали, что добавка метаксаолина повы-

шает марку цемента с М400 до М500. Прочность при сжатии на 28 сутки показала увеличение на 22% при количестве метаксаолина 5% от массы цемента в сравнении с контрольным образцом. При добавлении метаксаолина в количестве 10% наблюдается увеличение прочности на сжатие на 23%. Добавка в количестве 15% показывает более лучшие результаты, где прочность на сжатие увеличивается на 27%, а прочность при изгибе – на 22%. Из этого можно сделать выводы, что наиболее целесообразно использовать 10% или 15% добавки метаксаолина.

**Выводы.** Таким образом, с добавкой метаксаолина в цементных балках наблюдается значительное улучшение механических свойств, в частности прочности при сжатии и на изгиб. Было исследовано разное количество введения добавки в состав (5, 10, 15%), где введение в состав 15% добавки показало увеличение прочности на 27%.

В связи с этим, введение в состав портландцемента добавки-метаксаолина доказывает улучшение прочностных характеристик цемента и бетона в целом. Примечательно, что в Казахстане имеются месторождения каолиновых глин, которые могут служить сырьевой базой для производства метаксаолина.

Таблица 4 – Результаты проведенных испытаний на прочность при изгибе и сжатии с 10% и 15% содержанием метаксаолина

Обозначение вида цемента	Предел прочности, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )			
	При изгибе в возрасте, сут.		При сжатии в возрасте, сут.	
	3	28	3	28
ПЦ400Д20+10%	73,0	123	235	505
ПЦ400Д20+15%	78,2	127	250	520

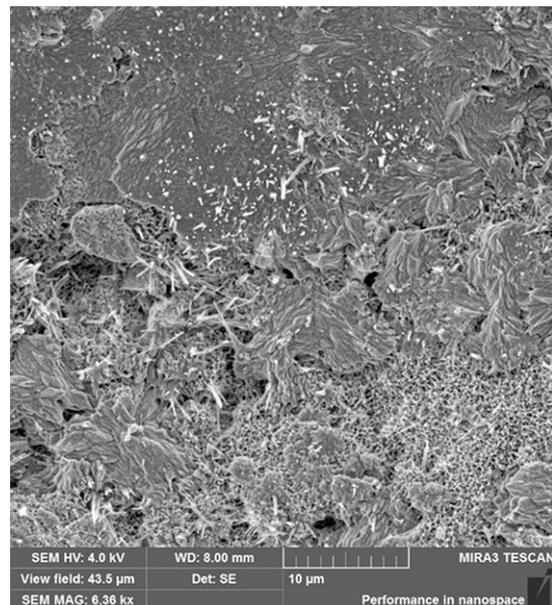
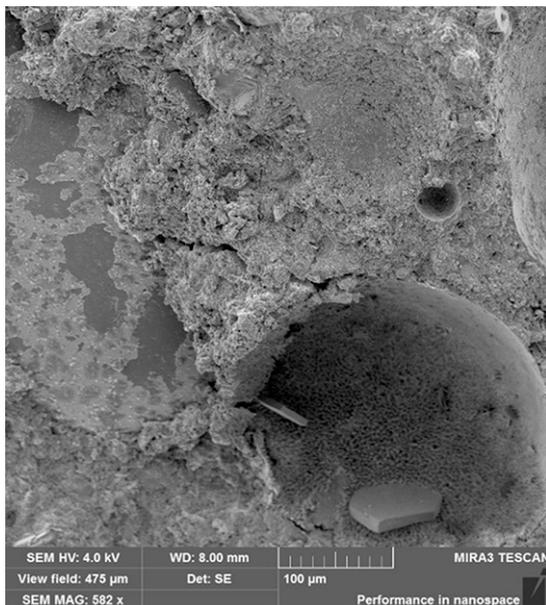


Рисунок 7 – Изображения микроструктуры цементных балок в сколе без добавки МТК

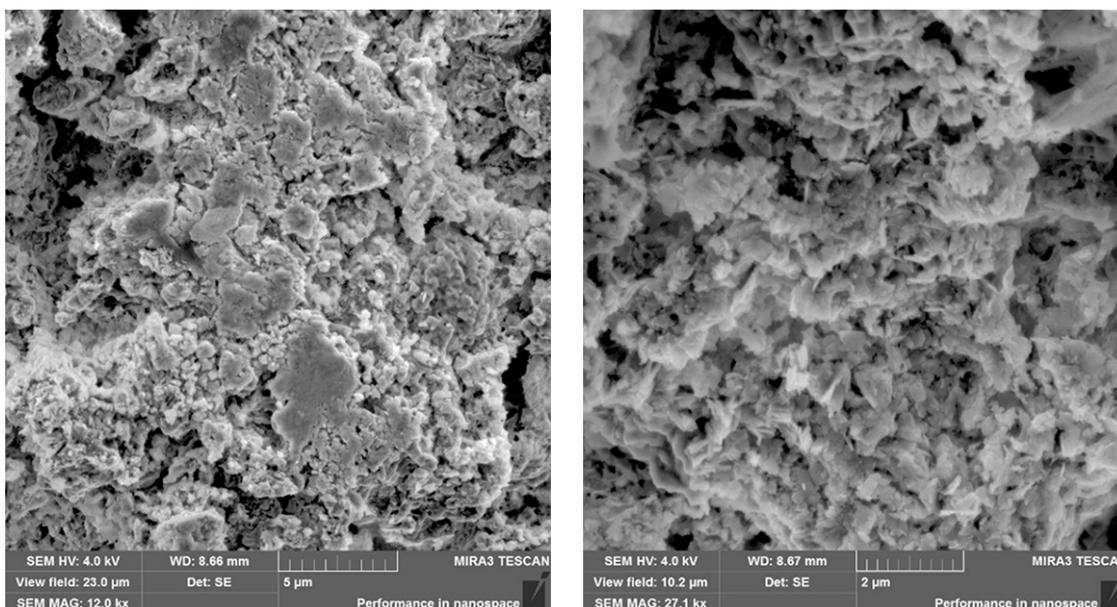


Рисунок 8 – Изображения микроструктуры цементных балок в сколе с 15% содержанием метакаолина

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахимова Г.М., Дамиев Д.Т., Хан М.А. Возможности и перспективы получения дорожного песчаного бетона // Труды Университета. 2020. № 2 (79). С. 165-168.
2. Rakhimova G.M., Rakhimov M.A., Suleimbekova Z.A. Modification of concrete railway sleepers and assessment of its bearing capacity // International Journal of GEOMATE. 2021. T 20. No. 77. Pp. 40-48.
3. Серова Р.Ф., Рахимова Г.М., Стасилович Е.А., Айдарбекова С.Ж. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов // Эпоха науки. 2018. № 14. С. 192-200.
4. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Баландина И.В., Тоимбаева Б.М., Хан М.А. Свойства комплексного органоминерального модификатора типа ОМЭ для технологии бетонов специального назначения // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 8-1. С. 35-40.
5. Р РК 218-148-2018 Цементы для цементобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог.
6. Р РК 218-117-2014 Рекомендации по технологии строительства цементобетонных покрытий с учетом климатических условий Казахстана для бетона покрытий и оснований.

### Метакаолиннің цемент жүйелерінің қасиеттеріне әсері

<sup>1</sup>РАХИМОВА Галия Мухамедиевна, т.ф.к., доцент, g.rakhimova@kstu.kz,

<sup>2</sup>ИЛЬИНА Лилия Владимировна, т.ф.д., профессор, l.ilina@sibstrin.ru,

<sup>1\*</sup>АЙСАНОВА Мадина Акпановна, докторант, madinochka222@mail.ru,

<sup>1</sup>РАХИМОВ Асхат Муратович, PhD, аға оқытушы, rakhimov.askhat@gmail.com,

<sup>1</sup>ТОИМБАЕВА Бакыт Мухамедиевна, магистр, аға оқытушы, toimbayeva@mail.ru,

<sup>1</sup>«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

<sup>2</sup>Жаңасібір мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті (Сибстрин), Ресей, Жаңасібір, Ленинградская көшесі, 113,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Құрамында аморфты  $\text{SiO}_2$  бар майда дисперсті минералды қоспалар әртүрлі мақсаттарда цемент бетондарында сәтті қолданылады. Оларды пайдалану төзімділіктің, беріктіктің және суға төзімділіктің жоғарылауына байланысты. Ең танымал және кеңінен қолданылатын пуццоландық модификаторлардың бірі микрокремнезем болып табылады. Микрокремнеземнің құрамында 95% дейін таза аморфты кремнезем бар кремнийі бар қорытпалар өндірісінің қалдықтарынан алынады. Микрокремнеземнің суға деген жоғары сұраныс сияқты кемшілігі бар. Өтеу үшін суперпластификатордың көп мөлшерін енгізу қажет. Соңғы жылдары жоғары белсенді метакаолин (МТК) әлемде жоғары тиімді пуццоландық қоспа ретінде танымал бола бастады. Бұл таза каолиниттерден жасалған жасанды экологиялық таза материал. МТК-ның өсіп келе жатқан танымалдылығы жаңа өнімдердің сәніне емес, осы материалдың объективті артықшылықтарына байланысты. Бұл жұмыстың мақсаты цементбетон жабындарын өндіруде метакаолинді қоспа ретінде

пайдалануды зерттеу, белсендірілген метакаолин негізінде цемент арқалықтарының негізгі механикалық қасиеттерін анықтау. Жұмыста қолданылатын ғылыми зерттеу әдістері-талдау, бақылау, эксперимент, модельдеу.

**Кілт сөздер:** метакаолин, жол бетоны, жол төсемі, цементобетон, толтырғыш.

### ***Influence of Metakaolin on the Properties of Cement Systems***

<sup>1</sup>**RAKHIMOVA Galiya**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, g.rakhimova@kstu.kz,

<sup>2</sup>**ILINA Liliya**, Dr. of Tech. Sci., Professor, l.ilina@sibstrin.ru,

<sup>1\*</sup>**AISANOVA Madina**, Doctoral Student, madinochka222@mail.ru,

<sup>1</sup>**RAKHIMOV Askhat**, PhD, Senior Lecturer, rakhimov.askhat@gmail.com,

<sup>1</sup>**TOIMBAYEVA Bakyt**, Master, Senior Lecturer, toimbayeva@mail.ru,

<sup>1</sup>NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

<sup>2</sup>Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia, Novosibirsk, Leningradskaya Street, 113,

\*corresponding author.

**Abstract.** *Finely dispersed mineral additives containing amorphous SiO<sub>2</sub> are successfully used in cement concretes for various purposes. Their use is due to increased durability, strength, water resistance. One of the most famous and widely used pozzolanic modifiers is microsilica. Microsilica is obtained from a waste from the production of silicon-containing alloys containing up to 95% pure amorphous silica. Microsilica has such a disadvantage as highwater demand. To compensate, the introduction of a large amount of superplasticizer is required. In recent years, highly active metakaolin (MTK) has become increasingly popular in the world as a highly effective pozzolanic additive. This is an artificial environmentally friendly material produced from pure kaolinites. The growing popularity of MTK is due not to the fashion for new products, but to the objective advantages of this material. The purpose of this work is to study the use of metakaolin as an additive in the production of cement concrete coatings, to determine the main mechanical properties of cement beams based on activated metakaolin. Scientific research methods at work – analysis, observation, experiment, modeling.*

**Keywords:** *metakaolin, road concrete, road surface, cement concrete, filler.*

## REFERENCES

1. Rakhimova G.M., Damiev D.T., Han M.A. Vozmozhnosti i perspektivy poluchenija dorozhnogo peschanogo betona. Trudy Universiteta. 2020. No. 2 (79). Pp. 165-168.
2. Rakhimova G.M., Rakhimov M.A., Suleimbekova Z.A. Modification of concrete railway sleepers and assessment of its bearing capacity. International Journal of GEOMATE. 2021. T 20. No. 77. Pp. 40-48.
3. Serova R.F., Rakhimova G.M., Stasilovich E.A., Ajdarbekova S.Zh. Issledovanie fiziko-mehaničeskix svojstv dispersno-armirovannyx betonov. Epoha nauki. 2018. No. 14. Pp. 192-200.
4. Rakhimov M.A., Rakhimova G.M., Balandina I.V., Toimbaeva B.M., Han M.A. Svojstva kompleksnogo organomineral'nogo modifikatora tipa OMJe dlja tehnologii betonov special'nogo naznachenija. Mezhdunarodnyj zhurnal jeksperimental'nogo obrazovanija. 2015. No. 8-1. Pp. 35-40.
5. R RK 218-148-2018 Cementy dlja cementobetonnyx pokrytij i osnovanij avtomobil'nyx dorog.
6. R RK 218-117-2014 Rekomendacii po tehnologii stroitel'stva cementobetonnyx pokrytij s učetom klimatičeskix uslovij Kazahstana dlja betona pokrytij i osnovanij.