

UDC 666.7
IRSTI 67.15.39
RESEARCH ARTICLE

CONSTRUCTION AND OPERATIONAL PROPERTIES OF CONCRETE ON MODIFIED BINDER

A.M. Zhilkibaeva^{1*} 

¹International Educational Corporation, 050028, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *The most important tasks of science in the field of construction: facilitating reinforced concrete structures, accelerating and reducing the cost of technological processes, in particular, abandoning heat treatment of products, increasing the durability of concrete can only be solved by giving special properties to binders. The way to solve this problem lies through the expansion of the range of complex mineral additives. Natural and man-made substances in a dispersed state, insoluble in water and characterized by grain size less than 0.16 mm, are used as mineral additives for binders and concretes. Despite the different effectiveness, mineral additives have a similar qualitative chemical composition (oxides of silicon, aluminum and others). The differences are in their mineralogical composition, the ratio of components and the degree of dispersion, which determine the predominant mechanism of their action in cement systems. Depending on the properties of the mineral additive, it is possible to obtain multicomponent binders for concretes with special properties: fast-hardening, high-strength, sulfate-resistant and others with significant savings in the cement component. The effectiveness of superplasticizers in dispersed systems can be increased due to a different procedure for their introduction or by combining them with finely ground mineral fillers of various chemical nature. The article presents the possibility of obtaining heavy concretes with specified construction and operational characteristics using a complex mineral additive, which includes waste from the tailings of the Balkhash mining and Processing plant and silica, as well as superplasticizers of various natures: MasterGlenium 305, Master Rheobuild 1000K and Master Air 200.*

Keywords: *heavy concrete, active additive, mineral additive, enrichment waste, complex additive, superplasticizers.*

***Corresponding author**

Aliya Zhilkibaeva, e-mail: aliya8706@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-03>

Received 08 February 2024; Revised 29 March 2024; Accepted 15 April 2024

ӘОЖ 666.7
ҒТАМР 67.15.39
ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ТҰТҚЫР БЕТОНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫС-ПАЙДАЛАНУ ҚАСИЕТТЕРІ

А.М. Жилкибаева* 

Халықаралық білім беру корпорациясы, 050028, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Құрылыс саласындағы ғылымның маңызды міндеттері: темірбетон конструкцияларын жеңілдету, технологиялық процестерді жеделдету және арзандату, атап айтқанда, өнімдерді термиялық өңдеуден бас тарту, бетондардың беріктігін арттыру тек тұтқыр заттарға арнайы қасиеттер беру арқылы шешілуі мүмкін. Бұл мәселені шешудің жолы күрделі минералды қоспалардың номенклатурасын кеңейту арқылы жатыр. Тұтқыр және бетондарға арналған минералды қоспалар ретінде суда ерімейтін және дәндерінің мөлшері 0,16 мм-ден аз болатын дисперсті күйдегі табиғи және техногендік заттар қолданылады. Әр түрлі тиімділікке қарамастан, минералды қоспалар жақын сапалы химиялық құрамға ие (кремний, алюминий, және басқалары оксидтері). Айырмашылықтар олардың минералогиялық құрамына, компоненттердің арақатынасына және цемент жүйелеріндегі олардың әсер ету механизмін анықтайтын дисперсия дәрежесіне байланысты. Минералды қоспаның қасиеттеріне байланысты арнайы қасиеттері бар бетондар үшін көп компонентті тұтқыр заттарды алуға болады: тез қататын, беріктігі жоғары, сульфатқа төзімді және басқалары цемент компонентін едәуір үнемдейді. Жоғары тиімді дисперсті толтырғыштардың құны цемент құнынан бірнеше есе жоғары болуы мүмкін екенін ескере отырып, мәселенің экономикалық аспектісін шешу үшін арзан толтырғыштарды іздеу маңыздырақ болады. Дисперсті жүйелердегі суперпластификаторлардың тиімділігін Оларды енгізудің әртүрлі процедуралары немесе оларды әртүрлі химиялық сипаттағы ұсақ ұнтақталған минералды толтырғыштармен біріктіру арқылы арттыруға болады. Мақалада Балқаш тау-кен байыту комбинаты мен микрокремнеземді байыту қалдықтары, сондай-ақ әртүрлі сипаттағы суперпластификаторлар: MasterGlenium 305, Master Rheobuild 1000K және Master Air 200 кіретін кешенді минералды қоспаны пайдалана отырып, берілген құрылыс-пайдалану сипаттамалары бар ауыр бетондарды алу мүмкіндігі келтірілген.

Түйін сөздер: ауыр бетон, белсенді қоспа, минералды қоспа, байыту қалдықтары, кешенді қоспа, суперпластификаторлар.

*Автор-корреспондент

Алия Жилкибаева, e-mail: aliya8706@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-03>

Алынды 08 ақпан 2024; Қайта қаралды 29 наурыз 2024; Қабылданды 15 сәуір 2024.

УДК 666.7

МРНТИ 67.15.39

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

СТРОИТЕЛЬНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ НА МОДИФИЦИРОВАННОМ ВЯЖУЩЕМ

А.М. Жилкибаева* 

Международная образовательная корпорация, 050028, Алматы, Казахстан

Аннотация. *Важнейшие задачи науки в области строительства: облегчение железобетонных конструкций, ускорение и удешевление технологических процессов, в частности, отказ от термообработки изделий, повышение долговечности бетонов могут быть решены только приданием специальных свойств к вяжущим веществам. Путь к решению этой проблемы лежит через расширение номенклатуры комплексных минеральных добавок. В качестве минеральных добавок для вяжущих и бетонов используются природные и техногенные вещества в дисперсном состоянии, нерастворимые в воде и характеризующиеся крупностью зерен менее 0,16 мм. Несмотря на различную эффективность, минеральные добавки имеют близкий качественный химический состав (оксиды кремния, алюминия и другие). Различия заключаются в их минералогическом составе, соотношении компонентов и степени дисперсности, обуславливающих преобладающий механизм их действия в цементных системах. В зависимости от свойств минеральной добавки возможно получение многокомпонентных вяжущих для бетонов со специальными свойствами: быстротвердеющих, высокопрочных, сульфатостойких и других при значительной экономии цементной составляющей. Эффективность действия суперпластификаторов в дисперсных системах может быть увеличена за счет различной процедуры их введения или сочетанием их с тонкомолотыми минеральными наполнителями различной химической природы. В статье приведена возможность получения тяжелых бетонов с заданными строительно-эксплуатационными характеристиками используя комплексную минеральную добавку, в состав которой входят отходы хвостов обогащения Балхашского горно-обогатительного комбината и микрокремнезем, а также суперпластификаторы различной природы: MasterGlenium 305, Master Rheobuild 1000K и Master Air 200.*

Ключевые слова: *тяжелый бетон, активная добавка, минеральная добавка, отходы обогащения, комплексная добавка, суперпластификаторы.*

*Автор-корреспондент

Алия Жилкибаева, e-mail: aliya8706@mail.ru

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-03>

Поступила 08 февраля 2024 г.; Пересмотрено 29 марта 2024 г.; Принято 15 апреля 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was conducted using private sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу жеке қаржыландыру көздерін пайдалана отырып жүргізілді.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование проводилось с использованием частных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

В качестве минеральных добавок для вяжущих и бетонов используются природные и техногенные вещества в дисперсном состоянии, нерастворимые в воде и характеризующиеся крупностью зерен менее 0,16 мм. Несмотря на различную эффективность, минеральные добавки имеют близкий качественный химический состав (оксиды кремния, алюминия, железа и другие). Различия заключаются в их минералогическом составе, соотношении компонентов и степени дисперсности, обуславливающих преобладающий механизм их действия в цементных системах (**Puharenko et al., 2010**).

Активность комплексных минеральных добавок, то есть способность связывать гидроксида кальция в присутствии воды при обычных температурах, обусловлена содержанием в них веществ, находящихся в химически активной форме (**Dvorkin et al., 2006**). Характер и интенсивность взаимодействия минеральной добавки с известью зависит от количества в ней тех или иных химически активных веществ.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В цементной промышленности широко применяют природные пуццолановые добавки – трепел, опоки, диатомит, активные вулканические породы, глины, обожженные при 600-700°C, а также активные золы и другие материалы. Их введение в состав цемента качественно не меняет характер взаимодействия клинкерных минералов с водой, однако скорость гидролиза и гидратации возрастает.

Происходит взаимодействие пуццолановых добавок с выделяющейся при гидратации цемента известью с образованием при обычной температуре соединений группы CSH(I), причем в зависимости от концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкой фазе значение C/S может колебаться в пределах 0,8-1,5 (**Shpynova & Chih, 1978**).

Экономичность производства смешанных вяжущих в значительной мере определяется технологичностью применяемых добавок. С этой точки зрения представляет интерес использование зол ТЭС, шлаков цветной и черной металлургии, фосфорных шлаков, известково-карбонатных отходов, отходов обогащения полиметаллических руд и других техногенных продуктов.

В зависимости от свойств минеральной добавки возможно получение многокомпонентных вяжущих для бетонов со специальными свойствами: быстротвердеющих, высокопрочных, сульфатостойких и других при значительной экономии цементной составляющей.

Эффективность действия суперпластификаторов в дисперсных системах может быть увеличена за счет различной процедуры их введения или сочетанием их с тонкомолотыми минеральными наполнителями различной химической природы (**Zhilkiyeva & Yestemessova, 2020**).

Повышение реологической активности связано с избирательной адсорбцией молекул СП на частицах минерального порошка, что может существенно повысить диспергирующее воздействие их на основную цементную систему.

Этот вопрос недостаточно исследован в цементных композициях, хотя в производственной практике аномальные реологические явления часто проявляются. Исходя из этого, необходимо выявить указанные аномалии и произвести научно обоснованный выбор реологического сочетаемого с СП дисперсного наполнителя.

По мнению авторов (**Irina & Gichko, 2013**), минеральные микронаполнители, вводимые в состав бетона, способствуют упрочнению структуры и продуктов гидратационного твердения портландцемента. Это приводит к изменению поровой структуры бетона и повышению их важнейших свойств: механической прочности и морозостойкости.

Критериями, определяющими активность минеральных наполнителей, являются: высокая химическая стойкость в воде, в агрессивных средах; высокая механическая прочность.

В последние два десятилетия исследования в этом направлении касались оптимальной дисперсности наполнителей, степени наполнения клинкерных цементов, необходимого химико-минералогического состава наполнителей, оптимизации процедуры раздельного помола с последующим смешиванием цемента с наполнителем, использования интенсивных раздельных технологий для получения малодефектной структуры цементного камня из композиционного вяжущего (**Vance et al., 2013; Tironi, 2015; Coumes et al., 2017**).

Учитывая, что стоимость высокоэффективных дисперсных наполнителей может быть в несколько раз выше стоимости цемента, то для решения экономического аспекта проблемы становится более важным поиск более дешевых наполнителей.

Ранее сформулированные научные принципы и практические рекомендации по предельному наполнению цементов и экономии его не могут быть реализованы в технологии высокопрочного бетона, твердеющего в нормальных условиях в силу необходимости решения иных задач, которые заключаются в следующем (**Berdov et al., 2014**):

- обеспечение быстрых темпов набора прочности в начальных сроках твердения и высокой требуемой прочности бетона;
- выбор наполнителей с хорошей сочетаемостью с суперпластификаторами для максимального использования их реологического действия;
- достижение более высокой дисперсности наполнителя, чем у цемента для обеспечения высокой реакционной способности с продуктами гидратации цемента и создания дополнительных центров кристаллизации;
- получение низкой пористости и высокой плотности бетона.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведенные нами исследования показали (**Zhilkibayeva & Yestemessova, 2020; Zhilkibayeva, 2021; Zhilkibayeva et al., 2022**), что активация отходов обогащения Балхашского ГОК микрокремнезёмом, увеличивая химический потенциал микрочастиц, существенно повышает химическую активность комплексной добавки, существенным образом определяющий прочностные показатели бетона.

Определение прочностных показателей бетона В35 с суперпластификатором MasterGlenium 305 показал, что при неизменном В/Ц в первые сутки наблюдается некоторое замедление набора прочности при сжатии. Однако, уже к третьим суткам отставание нивелируется, а в 7-суточном возрасте имеет прирост прочности.

Физико-механические свойства тяжёлого бетона класса В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 приведены в **Таблице 1**.

Таблица 1

Физико-механические свойства тяжёлого бетона класса В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 (материалы автора)

Класс бетона	Плотность бетона, кг/м ³	Пористость, %	Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте твердения, сут.						
			После тво	При естественном твердении					
				1	1	3	7	28	90
В 25	2430	4,5	27,9	16	20	25,0	34,5	35,6	36,3
В 35	2440	4,4	34,5	22	27	32,0	49,8	50,1	51,4

*Примечание: ТВО – тепло-влажностная обработка

Одним из важных показателей, определяющих качество вяжущих веществ, является его активность и кинетика нарастания прочности с увеличением срока твердения или в процессе эксплуатации бетонных и железобетонных изделий.

Кинетика нарастания прочности тяжёлого бетона В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1% СП MasterGlenium 305 приведена на **Рисунке 1**. Из **Рисунка 1** видно, что бетоны класса В25 и В35 в 28 суточном возрасте твердения соответственно набирают чуть выше 5-10% от требуемой прочности.

Разработанные составы бетона класса В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 в 28-суточном возрасте твердения набирают нормативную требуемую прочность. В начальных сроках твердения (7 сут.) бетоны класса В25 и В35 соответственно набирают 76,4 и 69,8% требуемой нормативной прочности.

На основании полученных результатов исследований механизм процесса гидратаций и твердения тяжёлого бетона В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1% СП MasterGlenium 305 можно разделить на две стадии:

– стадия интенсивной гидратации от 4,5 часов приготовления бетонной смеси до 7 суток твердения. При этом происходит гидратация клинкерных минералов, пуццолановая активация минеральной добавки и образования стабильных гидратов;

– стадия замедленной гидратации от 7 суток до года. В этом периоде происходит нивелирования деструктивных процессов за счёт пуццолановых реакций (**Таблица 2**).

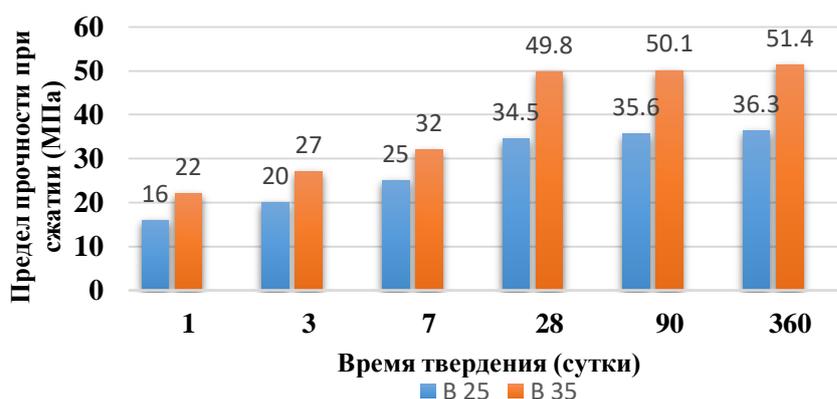


Рисунок 1 – Кинетика нарастания прочности тяжёлого бетона, на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1% СП MasterGlenium 305 (материалы автора).

Таблица 2

Спектры рентгеновской флуоресценции и химический состав цемента с МВ-Д20 в возрасте 28 суток (материалы автора)

Спектр	Концентрация обнаруженных элементов, % по массе										Итого
	С	О	Na	Mg	Al	Si	S	К	Ca	Fe	
С1	-	59.16	1.78	-	2.00	36.86	-	0.20	-	-	100.0
С2	-	51.26	5.02	0.62	10.0	28.62	0.40	1.32	9.90	1.68	100.0
С3	3.49	65.32	-	0.29	5.79	22.66	-	1.46	-	0.53	100.0
С4	4.62	33.79	-	0.48	3.56	7.89	0.26	0.99	0.39	4.24	100.0
С5	0.00	53.51	-	0.89	13.1	22.02	0.25	7.17	-	2.19	100.0
С7	-	20.72	-	-	1.89	66.87	-	3.37	2.54	4.61	100.0
С8	4.13	69.03	-	-	6.30	16.53	-	4.01	-	-	100.0
С9	5.25	20.72	-	-	5.97	24.83	-	1.82	0.36	1.19	100.0
Макс.	5.25	69.03	5.02	0.89	13.1	66.87	0.40	7.17	9.90	4.24	
Мин.	3.44	20.72	1.78	0.29	1.89	7.89	0.25	0.20	0.36	0.53	

Ранее установлено, что при использовании модифицированного вяжущего МВ-Д20 с добавкой 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305, третья стадия процесса гидратации (период интенсивного твердения) наступает через 5 час 30 мин.

Анализ скорости набора прочности показал (**Рисунок 1**), что при неизменном В/Ц в первые сутки наблюдается некоторое замедление набора прочности при сжатии. Однако, уже к третьим суткам отставание нивелируется, а в 7-бетоны класса В25 и В35 соответственно набирают более 70% требуемой нормативной прочности.

Известно, что при использовании портландцемента с минеральной добавкой замедляется рост прочности в первые 7 дней при сохранении проектной прочности. При этом, если для цемента без добавки 7-суточная прочность составляет 0,65-0,75 прочности 28-суточной, для портландцемента с 20% доменного шлака снижается до 0,55-0,65, с 35 % доменного шлака – до 0,5-0,6.

Введение в состав портландцемента в качестве активированных дисперсных наполнителей цеолитсодержащей кремнистой породы и волластонита приводит к повышению его прочностных свойств. При этом, в 28-суточном возрасте твердения предел прочности при сжатии повышается на 21-42% и при изгибе на 11-16%.

Имеется некоторое критическое содержание минеральной добавки, выше которого активность вяжущего вещества начинает снижаться, хотя марка цемента и цена остаются неизменными. Это критическое содержание для каждой минеральной добавки с учетом ее особенностей зависит от химико-минералогического составе цементного клинкера и добавки, тонкости помола и условия твердения (**Panina et al., 2013**).

Эффективность действия веществ, составляющих минеральных микронаполнителей, определяется близостью их удельной энтальпии образования, удельной энтропии к аналогичным характеристикам вяжущих веществ.

Активность минеральной добавки и ее влияние на механическую прочность в составе портландцемента необходимо рассматривать и оценивать по отдельности, т.к. значения этих показателей могут быть противоречивы. Обжиг добавок, имеющих низкую активность по поглощению СаО из известкового раствора, повышает гидравлическую активность цемента. И наоборот, минеральные добавки, обладающие высокой степенью взаимодействия с СаО, после активации могут снижать механическую прочность цементных образцов (**Berdov et al., 2014**).

При введении в состав композиционных цементных материалов минеральных наполнителей наблюдаются четко выраженные максимальные значения прочности, соответствующие оптимальному количеству добавок. При увеличении дисперсности минерального микронаполнителя оптимальное количество его уменьшается.

Основываясь на вышеприведенные выводы и результаты сравнительного анализа гидравлической активности цементов, перспективными минеральными добавками, способными в значительном количестве сократить долю клинкера в составе портландцемента без снижения механической прочности, необходимо определить экспериментально.

Физико-химические исследования показали, что использование комплексной минеральной добавки значительно сокращает количество портландита (**Рисунок 2**).

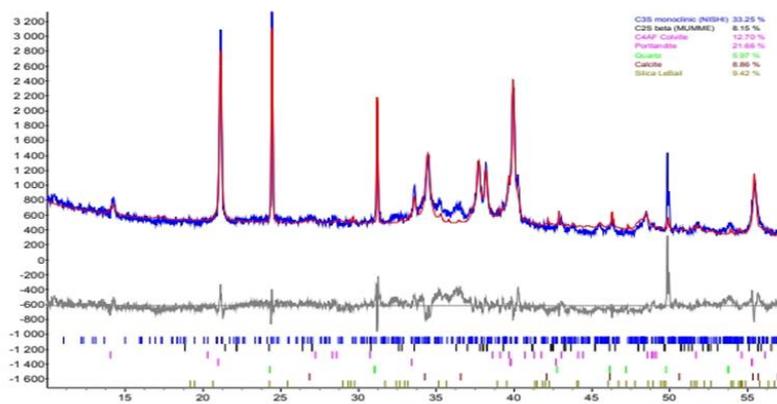


Рисунок 2 – Рентгенографический анализ тяжелого бетона В35 на основе модифицированного вяжущего с 20% комплексной добавкой в 14 суточном возрасте твердения (материалы автора)

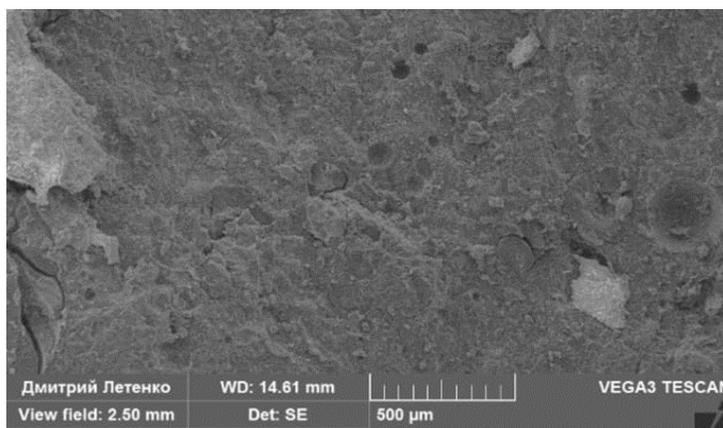


Рисунок 3 – Микроструктура тяжелого бетона В 35 на основе модифицированного вяжущего с 20 % комплексной минеральной добавкой в 28 суточном возрасте твердения, увеличение до 500 мкм. (материалы автора)

На **Рисунках 3, 4, 5** приведены растровые изображения – морфология и текстура продуктов гидратации с различными увеличениями. Масштабный фактор на **Рисунке 3** составляет 500 мкм и на рисунке 4, изображение а, составляет 50 мкм, для изображения б – 20 мкм.

На рисунке 4, при увеличении от 50 мкм до 20 мкм, хорошо видно процессы заполнения усадочных трещин новообразованиями. Можно полагать, что происходит нивелирования деструктивных процессов за счёт пуццолановых реакций.

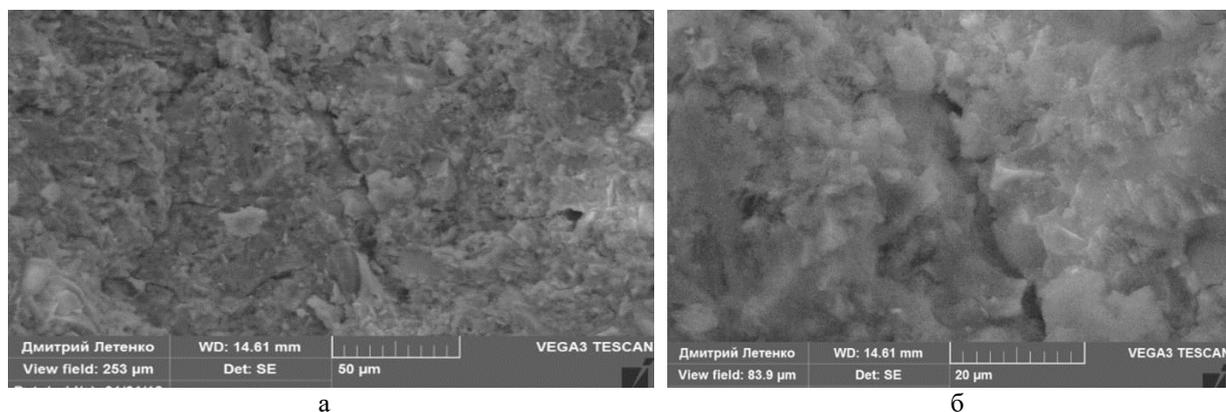


Рисунок 4 – Микроструктура тяжелого бетона В35 на основе модифицированного вяжущего с 20% комплексной добавкой в 14 суточном возрасте твердения: а – усадочная трещина, увеличение до 50 мкм; б – заполнение трещин гидросиликатами, увеличение до 20 мкм (материалы автора).

В процессе твердения, портландит связывается с активным кремнеземом комплексной минеральной добавки. Если портландит находится в аморфной форме пуццолановая реакция проходит быстрее (Zhakipbekov et al., 2021). В микроструктуре тяжелого бетона В35 на основе модифицированного вяжущего с 20% комплексной добавкой в 14 суточном возрасте твердения, при увеличении до 20 мкм наблюдается наиболее типичная форма гидросиликатов кальция, представляющего собой очень тонкие листы толщиной, равной толщине основного слоя (Рисунок 4 б, 5). Эти гидратные листы легко слипаются, образуя рыхлые складчатые агрегаты размером 2-10 мкм.

При увеличении до 50 мкм наблюдается также заполнение макропоры гидратами в форме сотовых микропор (Рисунок 5). Данная структура образовалась в процессе превращения макропор в микропоры и является результатом действия воздухововлекающей добавки MasterAir 200.

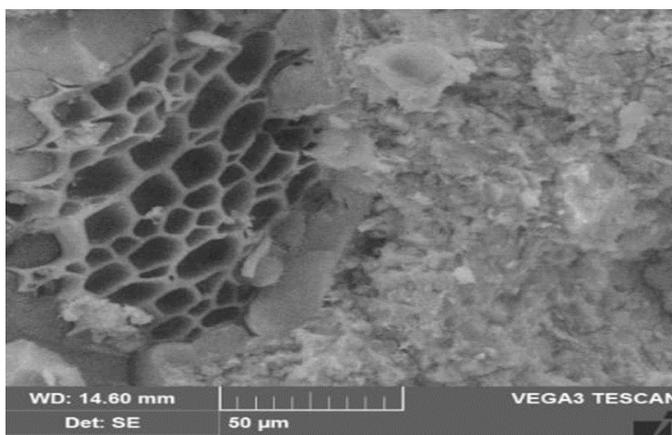


Рисунок 5 – Микроструктура тяжелого бетона В 35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 в возрасте 28 суток, увеличение до 50 мкм. (материалы автора).

Таким образом, разработанные составы тяжелых бетонов класса В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 по скорости набора прочности относятся к быстротвердеющим бетонам.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В соответствии с СП 28.13330. 2017 «Защита строительных конструкций от коррозии» бетоны по показателям проницаемости разделены на бетоны нормальной, пониженной и особо низкой проницаемости. В зависимости от степени агрессивности среды проницаемость бетона характеризуют прямыми показателями (маркой бетона по водонепроницаемости, коэффициентом фильтрации, диффузионной проницаемостью газа) и косвенными показателями (водопоглощением бетона и водоцементным отношением), которые должны использовать при подборе состава бетона.

Степень агрессивного воздействия на бетонные и железобетонные конструкции определяется: для жидких сред – наличием и концентрацией агрессивных агентов, температурой, напором или скоростью движения жидкости у поверхности; газовых сред – видом и концентрацией газов, растворимостью их в воде, влажностью и температурой среды; твердых сред (соли, аэрозоли, пыли) – дисперсностью, растворимостью в воде, влажностью окружающей среды.

Степень их агрессивного воздействия на бетон определяется в соответствии с требованиями ГОСТ 31384-2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от

коррозии. Общие технические требования» и СП 28.13330. 2017 «Защита строительных конструкций от коррозии».

Для установления возможности использования модифицированного тяжелого бетона В35 с применением комплексной минеральной добавки для строительства объектов с средне- и сильноагрессивной средой исследованы водопоглощение и водонепроницаемость.

Таблица 3

Водопоглощение тяжёлых бетонов классов В25 и В35 (материалы автора)

№ керна	Масса образца-керна, г			Масса поглощенной воды, в	
	до сушки	после сушки	после насыщения водой в течение 30 мин	г	%
Тяжелый бетон класса В 25					
1	2560	2430	2490	60	4,44
2	2550	2440	2490	50	3,69
3	2540	2420	2480	60	4,46
Среднее значение					4,20
Тяжелый бетон класса В 35					
1	2520	2410	2450	40	2,99
2	2520	2430	2480	50	3,70
3	2520	2430	2480	50	3,70
Среднее значение					3,46

В **Таблице 3** приведены результаты испытаний на водопоглощение модифицированных тяжёлых бетонов классов В25 и В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305.

Поскольку образцы-керны имеют длину, отличающуюся от 75 мм, для стандартизации объема образцов вводится поправочный коэффициент согласно требованиям ГОСТ 12730.5-2018. При испытании бетонных образцов-кернов диаметром 100 мм, поправочный коэффициент $K_{\text{п}}=1,8$, принят в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.0-2020 (**Таблица 4**).

Таблица 4

Поправочный коэффициент $K_{\text{п}}$

Диаметр образца-керна, мм	150	130	120	100	80	50
Поправочный коэффициент $K_{\text{п}}$	1,0	1,1	1,4	1,8	2,8	5,5

Результаты испытания на водопоглощение (**Таблица 3, Рисунок 6**) показали, что показатель водопоглощения бетона класса В25 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 в пределах – 3,69-4,46%. Среднее значение водопоглощения бетона В25 – 4,20%.

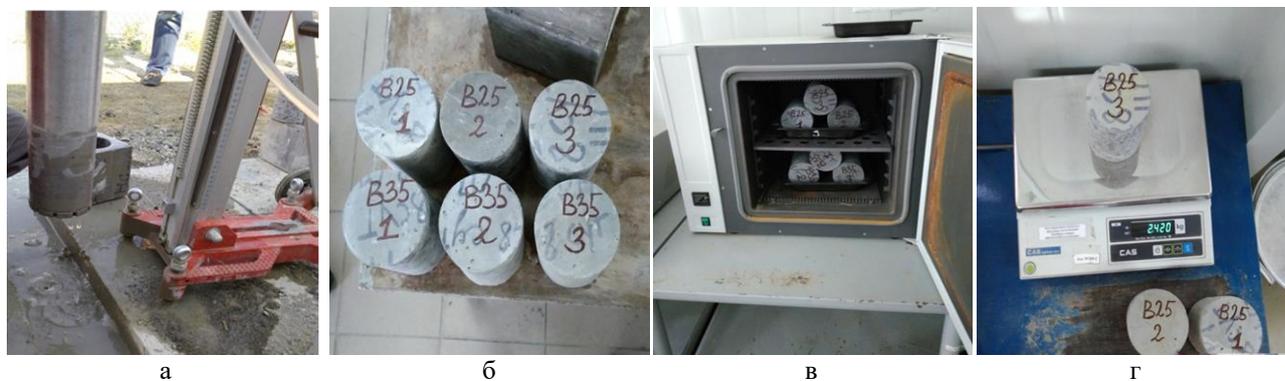


Рисунок 6 – Испытание образцов-кернов для определения водопоглощения

модифицированных бетонов классов В25 и В35: а – алмазная сверильная установка SOLGA SDR 450; б – маркировка образцов-кернов; в – сушка образцов до постоянной массы (низкотемпературная лабораторная электропечь SNOL 58/350); г – взвешивание образцов-керна после сушки до постоянной массы (весы лабораторные MWP-3000H. Сертификат о поверке №ВГ-000000401 от 02.05.2019 г.) (материалы автора).

Водопоглощение модифицированного тяжёлого бетона В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 составляет – 2,99-3,70%. Показатель среднего значения водопоглощения бетона В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с добавкой 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 – 3,46%.

Испытание бетона на водопоглощение очень важно и необходимо, ведь от проверки показателя зависит качество бетонных и железобетонных изделий, так как с понижением показателя водопоглощения повышается прочность и долговечность бетона.

Ускоренным методом определения водонепроницаемости бетона В35 с комплексной модифицирующей добавкой по его воздухопроницаемости проводили согласно ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Для проведения испытаний использовали:

- прибор «Агама-2РМ» для определения воздухопроницаемости бетона (**Рисунок 6**);
- герметизирующую мастику.

При испытании герметизирующую мастику жгутом диаметром не менее 6 мм укладывали на фланец камеры по его средней линии и соединяли концы. Камеру фланцем устанавливали на нижнюю (по условиям формования) поверхность образца и в полости камеры создали разрежение не менее 0,064 МПа.

Таблица 5

Водонепроницаемость модифицированного МВ-Д20 тяжёлых бетонов классов В25 и В35 с применением (материалы автора)

№ зерна	Сопротивление бетона прониканию воздуха по НД, с/см ³	Фактическое значение	Марка по водонепроницаемости, W
Тяжелый бетон класса В25			
1	13,8-19,6	18,4	10
2	13,8-19,6	18,6	10
3	13,8-19,6	19,0	10
Тяжелый бетон класса В35			
4	19,7-29,0	25,2	12
5	19,7-29,0	24,4	12
6	19,7-29,0	26,6	12

Результаты испытания на водонепроницаемость (**Таблица 5**) показали, что фактическое значение сопротивления бетона прониканию воздуха к бетону класса В25 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 в пределах – 18,4-19,0 с/см³. Марка бетона В25 по водонепроницаемости соответствует W10.

Для изготовления железобетонных конструкций согласно нормативным документам предусмотрена нормируемая проницаемость. Проницаемость бетона характеризуется прямыми показателями (маркой бетона по водонепроницаемости или коэффициентом фильтрации). Косвенные показатели (водопоглощение и водоцементное отношение) являются ориентировочными и дополнительными к прямым (**Dvorkin & Dvorkin, 2017**).

По нашему мнению, высокая дисперсность микрокремнезёма в составе комплексной добавки, обеспечивает высокую пуццолановую реакционную способность с продуктами гидратации цемента и создает дополнительные центры кристаллизации, что способствует низкой пористости и высокой плотности тяжёлого бетона.

Результаты испытания показали, что марка бетона В35 с модифицированным вяжущим по водонепроницаемости – W12, при этом фактическое значение сопротивления бетона прониканию воздуха к бетону класса В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 колеблется в пределах – 24,4-26,6 с/см³.

5 ВЫВОДЫ

1. Разработаны составы модифицированных бетонов классов В 25 и В 35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20, обеспечивающие в 28-суточном возрасте твердения нормативную прочность. В начальных сроках твердения (7 сут) бетоны классов В25 и В35 соответственно набирают более 70% от требуемой нормативной прочности.

Разработанные составы тяжелых бетонов классов В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 по скорости набора прочности относятся к быстротвердеющим бетонам.

2. Процессы гидратации и твердения тяжёлых бетонов В25 и В35 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1% СП MasterGlenium 305 можно разделить на две стадии:

– стадия интенсивной гидратации от 5,5 часов приготовления бетонной смеси до 7 суток твердения. При этом обеспечиваются гидратация клинкерных минералов, пуццолановая активация минеральной добавки и образование стабильных гидратов;

– стадия замедленной гидратации от 7 суток до года. В этом периоде обеспечивается нивелирование деструктивных процессов за счёт пуццолановых реакций. Исследования, проведенные на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3SEM при увеличении до 20 мкм, показали процессы заполнения усадочных трещин гидратными новообразованиями.

3. Показатель водопоглощения бетона класса В25 на основе модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 в пределах – 3,69-4,46%. Среднее значение водопоглощения бетона В25 – 4,20%.

4. Водопоглощение тяжёлого бетона В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 составляет – 2,99-3,70%. Показатель среднего значения водопоглощения бетона В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с добавкой 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 – 3,46%.

5. Фактическое значение сопротивления бетона прониканию воздуха к бетону класса В25 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 с 1,0% суперпластификатора MasterGlenium 305 в пределах – 18,4-19,0 с/см³. Марка бетона В25 по водонепроницаемости соответствует W10.

6. Получен бетон класса В35 с комплексной модифицирующей добавкой по водонепроницаемости – W12, при этом фактическое значение сопротивления бетона прониканию воздуха к бетону класса В35 с применением модифицированного вяжущего МВ-Д20 колеблется в пределах – 24,4-26,6 с/см³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Berdov, G. I., Nikonenko, N. I., & Mashkin A. N.** (2014). Increasing the strength of fine cement materials by introducing man-made mineral microfillers [Povyshenie prochnosti materialov iz tonkodispersnogo cementa vvedeniem tehnogennyh mineralnyh mikronapolnitelei]. Building materials, 5, 52-55. (in Russ.).
2. **Coumes, C. C. D., Dhoury, M., Champenois, J. B., Mercier, C., & Damidot, D.** (2017). Physico-chemical mechanisms involved in the acceleration of the hydration of calcium sulfoaluminate cement by lithium ions. Cement and Concrete Research, 96, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.004>.
3. **Dvorkin, L. I., Dvorkin, O. L., & Korneichuk, Y. A.** (2006). Low-cement concretes with ash-silica filler [Malocementnye betony s zolomikrokremnezemistym napolnitelem]. Popular Concrete Science 6, 17-27. (in Russ.).

4. **Dvorkin, L. I., & Dvorkin, O. L.** (2017) Testing of concretes and mortars: designing their compositions [Ispytaniya betonov I rastvorov: proektirovanie ih sostavov]. Infra-Inzheneriya: Moscow, Russia. (in Russ.).
5. **Ilna, L. V., & Gichko, N. O.** (2013). Cement materials with mineral microfillers [Cementnye materialy s mineralnymi micronapolnitelyami]. International Journal of Applied and Fundamental Research, 8, 122-124. (in Russ.).
6. **Panina, A. A., Kornilov, A. V., Lygina, T. Z. & Permyakov, E. N.** (2013). Activated dispersed mineral fillers for Portland cement [Aktivirovannye dispersnye mineralnye napolniteli dlya portlandcementsa]. Building materials, 12, 74-75. (in Russ.).
7. **Puharenko, Y. V., Magdeev, U. H., Bazhenov, Y. M. & Morozov, V. I.** (2010). Scientific and practical results of nanostructural modification of cement concretes. Fundamental research of the Russian Academy of Sciences on scientific support of Architecture, urban Planning and the construction industry of the Russian Federation in 2009 [Nauchnye I prakticheskie rezultaty nanostrukturnogo modifitsirovaniya cementnyh betonov. Fundamentalnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu arhitektury, gradstroitelstva I stroitelnoi otrasli Rosiskoi Federacii v 2009 godu] Nauch.tr: Moscow, Ivanovo, Russia, 111-116. (in Russ.)
8. **Shpynova L. G., & Chih V. I.** (1978). The relationship between the microstructures of clinker and cement powder and stone [Vzaimosvyaz mikrostruktur clincera I cementnogo poroshka I kamnya]. Cement 3, 6-8. (in Russ.).
9. **Tironi, A.** (2015). Hydration of ternary cements elaborated with limestone filler and calcined kaolinitic clay. Proceed. 14th internat. Congr. on the Chemistry of cement. Beijing, 1-7.
10. **Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., & Neithalath, N.** (2013). Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. Cement and Concrete Composites, 39, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.028>
11. **Zhakipbekov, S., Aruova, L., Toleubayeva, S., Ahmetganov, T., & Utkelbaeva, A.** (2021). The features of the hydration and structure formation process of modified low-clinker binders. Magazine of Civil Engineering, 103(3), 10302-10302. <http://dx.doi.org/10.34910/MCE.103.2>.
12. **Zhil kibayeva, A.M., & Yestemessova, A. S.** (2020). Scientific aspects of management of rheological characteristics of concrete mix [Nauchnye aspekty upravleniya reologicheskimi harakteristikami betonnoi smesi]. Bulletin of the Osh State University, 1, 7-11. (in Russ.).
13. **Zhil kibayeva, A.M., & Yestemessova, A. S.** (2020). Studies of the process of hardening and structuring of concrete using modified binders [Issledovaniya processa tverdeniya I structuroobrazovaniya betona s ispolzovaniem modifitsirovannyh vyazhushih veshestv]. Bulletin of the Kazakh head Architectural and Construction Academy, 4(78), 163-167. (in Russ.).
14. **Zhil kibayeva, A. M.** (2021). Technological ways to increase the activity of mineral additives [Tehnologicheskie sposoby povysheniya aktivnosti mineralnyh dobavok]. Modern science and young scientists: collection of articles of the 5th International Scientific and Practical conference, Penza, 36-36. (in Russ.).
15. **Zhil kibayeva A. M, Yestemessova A. S., Zhakipbekov S. K., & Matveeva, L.** (2022). Structural characteristics and performance of concrete with a composite modifying additive. Architectura and Engeneering, 7(2), 86-95. <http://dx.doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-2-86-95>