

УДК 666.97 + 625.84

## БЕТОН ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ

*Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков*

Для обеспечения высокого качества дорожных покрытий в Челябинской области принято решение при ремонте трассы М 5 использовать высокопрочные цементные бетоны. Как показывает анализ мировых тенденций в строительстве автомагистралей РФ отстаёт от развитых стран как по общей протяжённости дорог, так и по использованию бетонных покрытий. Асфальтобетонные покрытия несколько дешевле бетонных, но срок службы их в 2–3 раза меньше, чем цементнобетонных, применение же покрытий из высокофункционального дорожного бетона позволит обеспечить их долговечность при соответствующем уходе не менее 50 лет. Основными показателями качества дорожных бетонов являются прочность при изгибе и морозостойкость с учётом действия антиобледенителей. Наши эксперименты показали, что использование современного комплекса добавок – микрокремнезём и супер-пластификатора позволяет получать не только прочные, но и сверхстойкие бетоны на рядовых портландцементях класса СЕМ 1 42,5 Н, что обеспечивает их высокие эксплуатационные характеристики, необходимые для создания долговечных покрытий в суровых климатических условиях.

Ключевые слова: прочность при изгибе, морозостойкость, суперпластификатор, микрокремнезём.

В настоящее время бетон и железобетон – основной конструкционный материал, обеспечивающий вариативность механических характеристик в широких пределах, а также стойкость в различных условиях эксплуатации.

Одним из направлений применения бетона является широкое использование этого материала в дорожном строительстве. Протяжённость дорог в США 6506 тыс. км, Германии 844 тыс. км, Франции 951 тыс. км, России 982 тыс. км. Намечено построить до 2018 года не менее 120 000 км дорог в России. Распространение цементобетонных покрытий дорог: Китай 22 %, Германия 31 %, Бельгия 41 %, США 35 %, Россия 9 %.

Достоинства цементобетонных дорожных покрытий:

- стоимость 1 км трассы 26 млн руб. (асфальтобетонных – 25 млн руб.);
- устойчивы к истиранию, высокий коэффициент сцепления;
- прочность и деформативность не зависят от температуры и влажности;
- отсутствие колеи.

Статистические данные – фактические сроки службы дорожных покрытий с учётом интенсивности движения автотранспорта составляют:

- | асфальтобетонных               | цементнобетонных          |
|--------------------------------|---------------------------|
| • до 2500 авт/сут – 6 лет,     | до 3000 авт/сут – 14 лет, |
| • до 4500 авт/сут – 4 года,    | до 5000 авт/сут – 10 лет, |
| • до 6500 авт/сут – 3 года,    | до 7000 авт/сут – 8 лет,  |
| • более 6500 авт/сут – 2 года. |                           |

Исходя из статистики, цементнобетонные покрытия служат в 2,5–4 раза дольше, чем асфальтобетонные.

Дорожные и аэродромные покрытия представляют собой армированные или не армированные плиты на упругом основании, которые изгибаются и выгибаются под действием транспортных нагрузок. Поэтому основным расчётным напряжением является прочность бетона при изгибе –  $R_{изг}$ , для бетона дорожных и аэродромных плит должна быть не менее 3,6 МПа. Увеличение  $R_{изг}$  с 4...5 МПа до 6...6,5 МПа повышает срок службы дорожного покрытия с 20 до 30...50 лет. Прочность бетона при изгибе зависит от активности цемента – его прочности при изгибе  $R_{ц,изг}$  и плотности цементного камня, определяемой величиной Ц/В.

Другой важнейшей характеристикой дорожного бетона является морозостойкость при насыщении покрытия водными растворами антиобледенителя, применяемые марки по морозостойкости  $F_250...F_21000$ , как правило, для бетона дорожных и аэродромных плит  $F_2$  не более 200. Морозостойкость – способность материалов в состоянии насыщения жидкой фазой (водой или для дорожного бетона – 5 % раствором хлорида натрия) не разрушаться при циклическом замораживании и оттаивании. Эта характеристика чаще всего определяет продолжительность межремонтных сроков дорожных покрытий и зависит: от объёма, размеров пор и капилляров, наличия вовлечённого воздуха, от степени насыщения жидкой фазой, от состава жидкой фазы, от скорости и температуры замораживания, от В/Ц и структуры гидратных фаз цементного камня, от качества исходных материалов, от состава и характеристик бетонной смеси, степени её уплотнения, от длительности и качества ухода за бетоном и т.д. – всего более 100 факторов.

На кафедре «Строительные материалы» Южно-Уральского государственного университета были проведены исследования с целью выявления возможности получения дорожного бетона с морозостойкостью выше  $F_2200$  без введения воздухововлекающей добавки.

Для проведения эксперимента применяли портландцемент ЦЕМ 1 32,5 Н для мелкозернистого бетона и ЦЕМ 1 42,5 Н для тяжёлого бетона Коркинского цементного завода и природные гранодиоритовый щебень и кварцевый песок, удовлетворяющие требованиям соответствующих стандартов, суперпластификатор С-3 и микрокремнезём. Химический состав клинкера портландцементов и микрокремнезёма (МК) приведён в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав материалов

Материал	Содержание в % по массе						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ппп
Клинкер	21,04	5,81	4,71	65,81	1,94	0,34	0,14
МК	92,5	0,75	2,3	1,8	3,0	–	1,4

Для испытания морозостойкости мелкозернистого бетона были изготовлены образцы балочки 4x4x16 см состава 1:3 с использованием следующих предпосылок:

- капиллярная пористость цементного камня и бетона снижается при уменьшении В/Ц отношения;
- при В/Ц менее 0,35 лёд в цементном камне не образуется после первого замораживания, однако, с увеличением числа циклов появляются деформации расширения при замораживании, соответствующие льдообразованию в макрокапиллярных порах;
- в процессе циклического замораживания происходит коррозия 1 вида, связанная с выносом гидроксида кальция из цементного камня и со старением цементного геля;
- для стабилизации структуры цементного камня и повышения его стойкости к коррозии 1 вида необходимо введение активных минеральных добавок. Микрокремнезём – эффективная пуццолановая добавка, но он повышает водопотребность бетонной смеси, поэтому необходимо введение дополнительно водоредуцирующей добавки.

Матрица планирования эксперимента по определению влияния добавок микрокремнезема и суперпластификатора на свойства и морозостойкость бетона приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования

№ п/п	Доля микрокремнезёма		В/В		Дозировка С-3, %
	код	% по массе	код	Физ.	
1	-1	0	-1	0,250	0,6
2	0	10	-1	0,250	1,5
3	0	10	0	0,275	1,0
4	-1	0	1	0,300	0,2
5	0	10	1	0,300	0,7
6	1	20	1	0,300	1,5
7	1	20	-1	0,250	2,0
8	-	10	-	0,200	1,5

Усреднённые результаты механических и структурных испытаний образцов мелкозернистого бетона через 28 суток нормального твердения в соответствии с матрицей планирования (по каждому виду испытаний испытывалось по 6 образцов или проб, кроме испытания прочности при изгибе, для определения которой испытывались по 3 балочки) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов

№ п/п	Прочность, МПа, при		Количество, % по массе		Уд. поверхность, м <sup>2</sup> /г	Гелевая пористость, %
	сжатию	изгибе	Ca(OH) <sub>2</sub>	хим. связ. воды		
1	69,5	7,32	4,2	9,5	152	75,5
2	69,5	8,28	1,6	7,8	165	70,2
3	64,3	8,66	2,5	10,6	166	72,3
4	56,7	5,85	5,8	12,4	146	71,5
5	63,0	7,12	2,5	7,0	174	68,5
6	62,6	9,18	0,5	10,0	189	69,6
7	76,1	8,95	0,1	8,0	172	79,5
8	81,4	9,33	1,0	7,8	133	79,4

Из полученных данных можно выявить влияние микрокремнезема с суперпластификатором на свойства и структуру песчаного бетона:

- увеличение добавки микрокремнезёма способствует увеличению прочности бетона при сжатии и изгибе, особенно интенсивно увеличивается прочность при изгибе при постоянной величине водовяжущего отношения;
- введение добавки аморфного супердисперсного кремнезёма приводит к росту количества низкоосновных гидросиликатов с высокой степенью дисперсности и конденсации кремнекислородных анионов. Это сопровождается обогащением цементного камня силоксановыми группами с прочными ковалентными связями, что предопределяет их повышенные связующие свойства, отражающиеся в наибольшей степени на прочности при изгибе;
- с увеличением количества микрокремнезёма при любом водовяжущем отношении наблюдается рост энергии кристаллизации волластонита (площадь экзоэффекта на кривой дифференциально-термического анализа при 850...870 °С), что позволяет предполагать увеличение объёма тонкодисперсных низкоосновных гидросиликатов кальция;

- введение добавки МК приводит к росту микропористости системы, увеличению доли гелевых пор, объём которых возрастает с увеличением В/В от 0,25 до 0,30. С увеличением объёма цементного геля возрастает релаксационная способность цементного камня бетона, уменьшается концентрация напряжений при циклических воздействиях.

- замена части цемента на микрокремнезём вызывает рост отношения  $R_{ИЗГ}/R_{СЖ}$  при любых значениях В/В, что способствует повышению трещиностойкости бетона.

В дальнейшем проводили испытание морозостойкости образцов мелкозернистого бетона путём насыщения и замораживания до  $-50 \pm 2$  °С в 5 % растворе хлорида натрия. Результаты испытания прочности образцов после различного числа циклов приведены в табл. 4, 5.

Таблица 4

Прочность при сжатии при испытании морозостойкости  
мелкозернистого бетона, насыщенного 5 % раствором NaCl

В/В	Сод-е МК, %	Прочность МПа через следующее количество циклов						
		0	10	20	30	40	50	60
0,2	10	84	81	85	80	83	84	90
0,25	0	68	68	67	66	67	60	52
	10	67	66	68	66	67	64	68
	20	78	74	75	75	77	78	82
0,3	0	57	53	46	39	32	27	26
	10	62	63	64	61	62	62	60
	20	62	63	64	59	56	47	38

Таблица 5

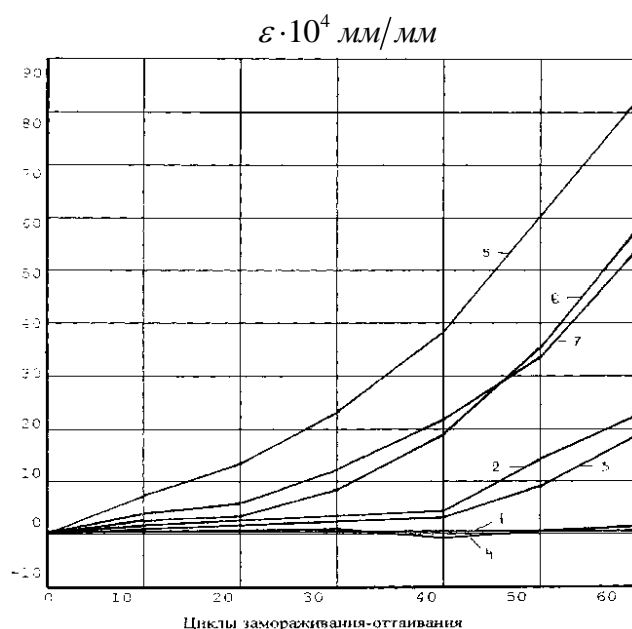
Прочность при изгибе при испытании морозостойкости  
мелкозернистого бетона, насыщенного 5 % раствором NaCl

В/В	Сод-е МК, %	Прочность МПа через следующее количество циклов						
		0	10	20	30	40	50	60
0,2	10	9,3	9,5	11,0	10,3	10,2	9,8	9,4
0,25	0	7,2	5,7	5,6	4,8	3,8	2,5	2,7
	10	8,2	8,3	8,2	7,6	7,3	4,4	4,2
	20	8,8	9,2	9,1	8,5	8,3	8,4	8,8
0,3	0	5,8	3,6	2,5	1,8	1,7	1,3	1,1
	10	7,2	8,2	6,3	3,8	2,4	1,3	1,0
	20	9,0	8,2	6,2	4,4	2,6	1,6	1,4

Измерялись также накопления остаточных деформаций расширения образцов в процессе циклического замораживания. Результаты этих измерений представлены на рис.

Наиболее стойкими оказались образцы под № 1 – В/В=0,2, 10 % МК и под № 4 – В/В=0,25, 20 % МК. Они после 60 циклов не имели остаточных деформаций удлинения.

Исходя из результатов испытания мелкозернистого бетона, были запро-ектированы и изготовлены образцы тяжелого бетона при постоянных величинах В/Ц = 0,28, расходе цемента 550 кг и добавки С-3 2 % с добавкой микрокремнезёма от 0 до 20 % от массы цемента. Рецептуры и свойства бетонной смеси с добавкой МК и С-3 при В/Ц = 0,28 приведены в табл. 6. Бетонная смесь приготавливалась без введения воздухововлекающих добавок, а в табл. 6 показатель «воздух» характеризует величину остаточного воздуха, то есть степень уплотнения бетонной смеси.



Результаты накопления относительных остаточных деформаций удлинения при циклическом замораживании: 1 – В/В=0,2, 10 % МК; 2 – В/В=0,25, без МК; 3 – В/В=0,25, 10 % МК; 4 – В/В=0,25, 20 % МК; 5 – В/В=0,3, без МК; 6 – В/В=0,3, 10 % МК; 7 – В/В=0,3, 20 % МК

Количество заполнителей уменьшалось на количество вводимого микрокремнезёма при неизменном соотношении между мелким и крупным заполнителями.

По рецептуре бетонных смесей табл. 6 изготавливались серии бетонных образцов с ребром 10 см, которые через 28 суток нормального твердения подвергались насыщению в течение 3 суток раствором 5 % хлорида натрия

и затем подвергались циклическому замораживанию в кюветах с 5 % раствором хлорида натрия при  $-50 \pm 2$  °С и оттаиванию в ваннах с раствором 5 % хлорида натрия в соответствии с требованиями ГОСТ10060. Результаты испытания морозостойкости образцов бетона приведены в табл. 7.

Таблица 6

Составы и свойства бетонных смесей

Показатели	Номера составов бетонной смеси					
	1	2	3	4	5	6
Расход цемента, кг	550	550	550	550	550	550
Расход песка, кг	528	519	508	500	490	481
Расход щебня, кг	1236	1215	1190	1170	1148	1127
Расход воды, кг	154	154	154	154	154	154
МК, % от цемента	0	5	10	15	20	25
С-3, % от цемента	2	2	2	2	2	2
В/Ц	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
В/В	0,28	0,266	0,254	0,244	0,234	0,224
Осадка конуса, см	2	16	20	14	11	4
Воздух, % по объёму	2,6	2,2	1,9	0,8	1,3	0,9
Ср. плотность, кг/м <sup>3</sup>	2462	2413	2411	2437	2420	2428

Таблица 7

Результаты испытания морозостойкости бетона ускоренным способом

Характеристики	Номера составов бетонной смеси					
	1	2	3	4	5	6
Ср. плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	2458	2460	2451	2456	2452	2450
Прочность при сжатии, МПа, после						
0 циклов	52,5	70,3	70,6	73,3	80,9	84,1
35 циклов, F <sub>2</sub> 300	58,8	69,5	72,4	85,9	82,8	84,2
55 циклов, F <sub>2</sub> 400	49,4	58,2	80,4	85,0	83,2	83,9
80 циклов, F <sub>2</sub> 500	–	–	66,4	83,8	83,5	83,5
105 циклов, F <sub>2</sub> 600	–	–	–	75,3	86,2	75,5

Из полученных результатов следует, что добавка микрокремнезёма обеспечивает без воздухововлечения повышение морозостойкости бетона при постоянном В/Ц. Без добавки МК и с 5 % добавки образцы бетона показали морозостойкость, соответствующую марке F<sub>2</sub>300, с 10 % F<sub>2</sub>400, с 15 % F<sub>2</sub>500, с 20 % F<sub>2</sub>600, более 20 % видимо добавку МК вводить не следует, так как при 25 % наблюдается спад морозостойкости. На основа-

нии проведённых исследований можно сформулировать условия обеспечения высокой морозостойкости дорожного бетона без воздухововлечения:

- низкие исходные значениям В/Ц обеспечивающие снижение капиллярной пористости и водонасыщения;
- повышенное содержание МК для формирования гелеобразных низкоосновных гидросиликатов кальция, обеспечивающих релаксацию возникающих напряжений;
- для дорожных бетонов при низком содержании вовлечённого воздуха с марками по морозостойкости F<sub>2500</sub>–F<sub>2600</sub> рекомендуются значения В/Ц= 0,25–0,30 и добавки микрокремнезёма до 15–17 % от массы цемента при обязательном введении водоредуцирующих добавок.

[К содержанию](#)