

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Строительный факультет

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА И
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы 72– й студенческой
научно-технической конференции

14 – 26 мая 2016 г.

Минск
БНТУ
2016

УДК 691.32

ББК 38.3

А 43

Редакционная коллегия:

Э. И. Батяновский – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология бетона и строительные материалы»;

М. Г. Бортницкая – старший преподаватель кафедры «Технология бетона и строительные материалы»

Рецензенты:

В. В. Бабицкий – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология бетона и строительные материалы»;

Г. Т. Широкий – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология бетона и строительные материалы»;

П. И. Юхневский – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология бетона и строительные материалы»

Сборник содержит материалы 72-й студенческой научно-технической конференции «Актуальные проблемы технологии бетона и строительных материалов». В издании освещены материалы пленарного заседания, исследующего проблемы технологии производства и особенности эксплуатации бетона и других строительных материалов.

Издание предназначено для научно-педагогических работников, студентов, магистрантов и аспирантов.

ISBN

© БНТУ 2016

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Горляк В.С., Стельмах М.В.</i> Кинетика твердения цементного камня с УДМК	4
<i>Канапацкий Д.В., Ясюк А.А.</i> Исследование эксплуатационных свойств бетона на портландцементе с миндобавкой	11
<i>Ловков И.И., Фетисова Е.С.</i> Методика ускоренного определения морозостойкости	22
<i>Русак Д.М., Ткаличев Д.А.</i> Оценка различных приемов введения углеродных наноматериалов в цементные бетоны.....	32

Кинетика твердения цементного камня с УДМК

Горляк В.С., Стельмах М.В.

Научный руководители – Гуриненко Н.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Развитие строительной индустрии в последнее десятилетие осуществляется под знаком все возрастающих требований по рациональному и эффективному использованию сырьевых и энергетических ресурсов. Это затрагивает развитие всех отраслей промышленности строительных материалов и изделий.

В современной технологии бетона, наряду с ее совершенствованием применительно к задачам снижения энерго- и материалоемкости конструкционного бетона общестроительного назначения, все большую значимость приобретают разработки, направленные на получение бетона высокопрочного, особо плотного, повышенной долговечности.

Общепризнанно, что для получения бетона прочностью $f_{cm,28} \geq 100$ МПа дозировка микрокремнезема составляет $\sim 10\%$ от массы цемента. Это означает, что для его введения в состав приготавливаемой бетонной смеси необходимо дополнительное оборудование бетоносмесительных установок соответствующими механизмами. Вместе с тем, наряду с «традиционным» микрокремнеземом – побочным продуктом производства феррокремниевых сплавов, химическая промышленность выпускает ультрадисперсные виды кремнезема в порошкообразном, золеобразном и гелеобразном состоянии.

По классификации Ратина-Розенберг [1] такие вещества относят к добавкам третьего класса (кристаллические затравки). Оценка их эффективности в цементных бетонах практически отсутствует. Вместе с тем степень их дисперсности (удельная поверхность, $S_{уд} \sim 350$ м²/г) на один – два порядка выше, чем у «традиционного» микрокремнезема ($S_{уд} \sim 3$ м²/г). В этой связи представляется перспективной замена микрокремнезема на «ультрадисперсный» микрокремнезем (УДМК).

Особенностью его применения является проблема равномерного распределения добавок в объеме бетона при использовании десятых и сотых долей процента от массы цемента, т.к. добавка находится в твердом (порошкообразном) состоянии. Один из путей решения этой проблемы – использование высокоэффективных пластифицирующих добавок. Это обусловлено тем, что молекулы суперпластификатора обладают способностью диспергирования частиц и обеспечивают условия для равномерного распределения тонкодисперсного нерастворимого в воде твердофазного УДМК.

Учитывая этот фактор, возникает необходимость исследований многофункциональной многокомпонентной комплексной добавки, в частности, определение рационального соотношения компонентов, которое позволит получить высокоэффективную многофункциональную комплексную добавку для высокопрочного, особо плотного и долговечного цементного бетона.

Дисперсность и значительная удельная поверхность зерен аморфного кремнезема обуславливают высокие пуццоланические свойства и его положительное влияние на свойства бетона. Кремнезем в таком виде легко вступает в реакцию с гидроксидом кальция, высвобождаемой в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH в результате реакции:



Известно [2-4], что прочность зоны контакта (переходной зоны) между цементным камнем и заполнителем меньше прочности самого цементного камня. Зона контакта характеризуется большей пористостью, образующейся вследствие большего количества свободной воды около зерен заполнителя и меньшей плотностью упаковки частиц цемента у его поверхности. В этом пространстве скапливается большее количество портландита и формируются крупные кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кристаллы портландита обладают меньшей прочностью, чем гидратированные силикаты кальция CSH, и, с учетом большей пористости, контактная переходная зона является слабым местом в тяжелом бетоне.

Добавка в бетон аморфного кремнезема приводит к уплотнению структуры контактной переходной зоны за счет реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В результате снижается ее пористость, возрастает качество (силы) сцепления цементного камня с заполнителем (и арматурой в железобетоне). Пуццоланические реакции, как фактор химического воздействия, вызывают дальнейшее повышение плотности и прочности бетона.

Одновременно, тонкодисперсные частицы УДМК могут служить «центрами кристаллизации», вокруг которых с меньшими затратами энергии, а значит – и в более высоком темпе, формируются кристаллогидратные новообразования – продукты взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой. Являясь своеобразной «подложкой», мельчайшие частицы УДМК катализируют процесс формирования кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что отражается в росте темпа «набора» прочности бетоном.

Следует отметить, что связывание и перевод аморфным кремнеземом $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в нерастворимые гидросиликаты кальция требует исследований и оценки защитной способности высокопрочных бетонов по отношению к стальной арматуре, т.к. возможно ее снижение (из-за понижения с течением времени рН- фактора бетона), несмотря на рост его плотности.

Все это в совокупности и определяет роль УДМК в формировании более плотной и прочной структуры цементного камня и бетона в целом и необходимость его использования для получения бетона повышенной прочности.

Преследуя цель использования УДМК для получения высокопрочного бетона, исследовали влияние этой добавки на кинетику роста прочности цементного камня и определяли оптимальный расход (дозировку) добавки.

В исследованиях использовали в качестве вяжущего вещества - портландцемент марки ПЦ 500. В качестве пластификатора использовали «Стахемент 2000». В исследованиях использовали водный раствор добавки 35%-ой концентрации в количестве 1% жидкости от массы цемента.

В качестве активной минеральной добавки аморфного SiO_2 использовали ультрамикрокремнезем.

На рис.1-3 представлены результаты испытаний в виде графических зависимостей, отражающих изменения прочности цементного камня во времени в зависимости от дозировки аморфного SiO_2 (УДМК) относительно массы цемента в сочетании с неизменной дозировкой пластификатора без начального нагрева (рис. 1, а) и б) и рис. 3) и с начальным нагревом до $t = 30 \dots 40^\circ\text{C}$ (рис. 2, а) и б)). Их анализ показывает наличие общей тенденции роста прочности цементного камня с введением в цементное тесто (вместе с водой затворения) аморфного кремнезема.

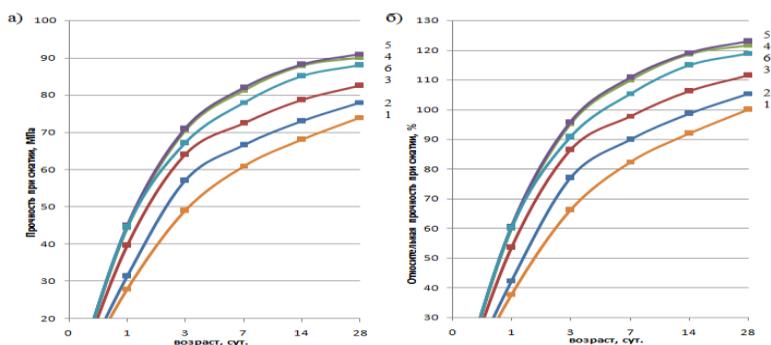


Рисунок 1. Тенденция роста прочности цементного камня в нормально-влажностных условиях (а – на сжатие в МПа; б – то же в %): №1 - без добавки, №2 - 1% St2000, №3 - 0,1% SiO_2 + 1% St2000, №4 - 0,5% SiO_2 + 1% St2000, №5 - 0,75% SiO_2 + 1% St2000, №6 - 1% SiO_2 + 1% St2000

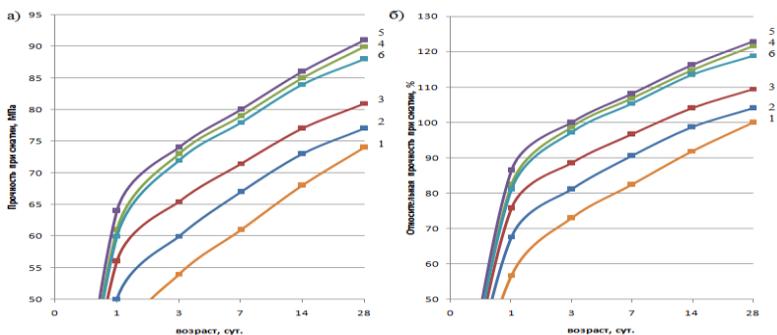


Рисунок 2. Тенденция роста прочности цементного камня с нагревом $\leq 40^{\circ}\text{C}$ (а – на сжатие в МПа; б– то же в %): №1-без добавки, №2 - 1%St2000, №3 - 0,1%SiO₂ +1%St2000, №4 - 0,5%SiO₂ +1%St2000, №5 - 0,75%SiO₂ +1%St2000, №6 - 1%SiO₂ +1%St2000

Очевиден (рис. 1 и 2) эффект кратковременного низкотемпературного ($\leq 40^{\circ}\text{C}$) подогрева с последующим медленным «остыванием – твердением» в первые 1...3 суток. Важно, что ускорение роста прочности цементного камня в начальные сроки не вызвало её снижения к проектному возрасту (28 суток), при последующем твердении в нормально-влажностных условиях. Это обеспечивает возможность форсирования твердения бетона (при необходимости) в условиях производства изделий (конструкций) без ухудшения его физико-механических свойств в более поздние сроки твердения.

Выявлен оптимум расхода (дозировки) добавки УДМК, составляющей 0,5...0,75% от массы цемента (рис. 3 а) и б)), за пределами которого её эффективность, отражённая в росте прочности цементного камня, не возрастает или даже снижается.

Результаты экспериментов с цементным камнем явились основанием для исследований по оценке эффективности добавок в конструкционном бетоне. В настоящей статье частично приведены данные о кинетике твердения высокопрочного бетона (100...110 МПа), полученного на составах, приведенных в табл. 1, и характеризующегося наличием в составе «традицион-

ного» микрокремнезема (МК) в дозировке 10% от МЦ и с заменой его на ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) в дозировке 1% от МЦ.

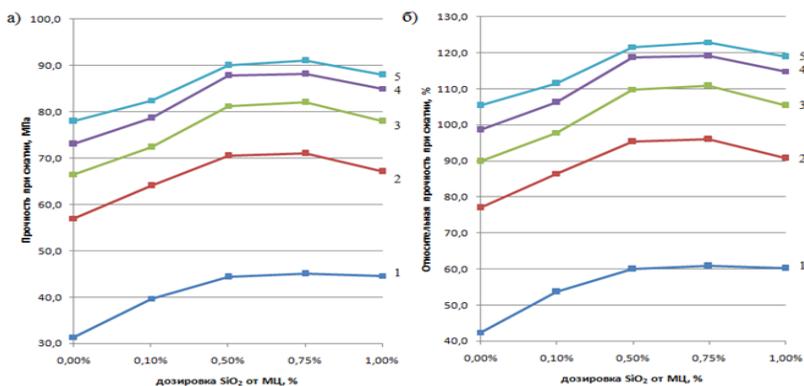


Рисунок 3. Влияние дозировки SiO₂ на прочность цементного камня (а – на сжатие в МПа; б– то же в %) в возрасте: №1 – 1 суток, №2 – 3 суток, №3 – 7 суток, №4 – 14 суток, №5 – 28 суток (нормально-влажностные условия твердения)

Таблица 1 – Составы бетона

№ состава	Расход компонентов, кг:							Хим. добавка, St 2000, % от МЦ (C~35%)	ОК, см
	Цемент	Песок	Кубовидный ще- бень		МК	УДМК	Вода		
			2...4	4...6					
1	530	604	370	806	53	-	147	1,5	6
2	530	654	370	806	-	5,3	149	1,5	5

Из данных рис.4 следует, что такая замена возможна, т.к. ультрадисперсный микрокремнезем обеспечивает примерное

равенство как темпа роста прочности бетона, так и ее значение в проектном возрасте, при дозировке, на порядок меньшей относительно «МК». Тем самым упрощается технология приготовления бетонной смеси для высокопрочного бетона, т.к. «УДМК» вводят в состав с водой затворения.

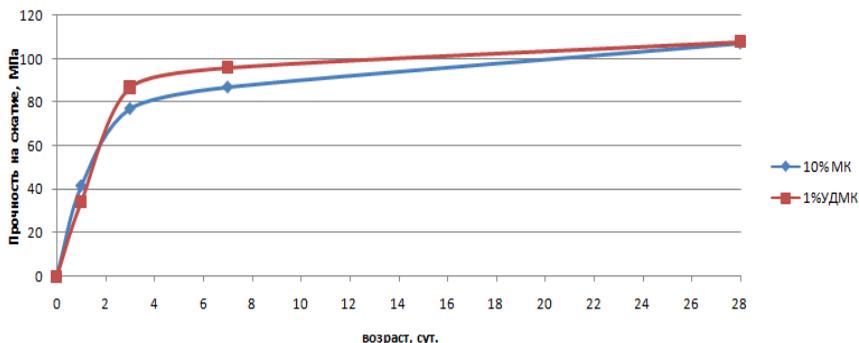


Рисунок 4. Тенденция роста прочности бетона

Исходя из изложенного, обосновывается переход от использования «МК» к введению в бетон «УДМК», что упрощает процесс его приготовления.

Литература:

1. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
2. Scrivener, Karen L, Crumbie, Alison K., Pratt, P.L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete //Bond.CementitiousCompos.:Symp., Boston, Mass., Dec. 2 - 4, 1987. - Pittsburgh (Pa), -1988. -p.87 - 88.
3. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste. //J. Chin. Silic.Soc., 1987, N2.- p. 114-121.
4. Detwiler Rachel J., Monteiro Paulo J.M., Wenk Hans-Rudolf, ZhongZengqiu. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface //Cem.AndConcr.Res., 1988, M5, - p.823 – 829.

Исследование эксплуатационных свойств бетона на портландцементе с миндобавкой

Канапацкий Д.В., Ясюк А.А.

Научный руководители – Смоляков А.В.
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Общая методика исследований. В процессе исследований выявили влияние количественного содержания минеральной добавки – продукта помола гранитного отсева в цементе, на водостойкость и прочность, водопоглощение и морозостойкость, а также на коррозионную стойкость бетона в солевой среде (раствор NaCl, как наиболее характерная для Беларуси агрессивная среда). Кроме того оценено экспериментально влияние миндобавки на коррозионное состояние стальной арматуры в бетоне и на защитную способность бетона с миндобавкой по отношению к стальной арматуре при внешней агрессии солей-хлоридов (раствор NaCl).

Характеристики материалов для бетона. В исследованиях использовали материалы для бетона, характеризующимися следующими данными:

-вяжущее – портландцемент марки М500 Д0, и полученный совместным помолом клинкера, гипса и гранитного отсева ПРУП "Кричевцементошифер;

-мелкий заполнитель – песок природный Крапужинского месторождения с модулем крупности $M_k=2,2$;

-крупный заполнитель – щебень гранитный (Микашевичский);

-добавка суперпластификатора (СП) – Стахемент-Ф Ж 35;

Твердение в воде

Твердение в воде заключалось в экспериментах по выявлению влияния минеральной добавки в цементе на стойкость бетона в неагрессивной водной среде (эксплуатации) с использованием образцов-кубов с размером грани 100 мм, данные которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Прочность бетона при твердении в воде

№ п/п	Характеристики бетона:			Добавка СП, % от СВ	Прочность бетона, МПа, в возрасте, сут.:				
	Цемент:				3	7	14	28	60
	Расход, кг	Мин-добавка							
		кг	%						
1	350	-	-	-	16,5	23	29,5	33	36
2	315	35	10	-	14	21,6	26,9	30,5	35
3	280	70	20	-	12,5	20,5	25,8	28,5	32
7	245	105	30	-	8,0	13,9	18,2	22,6	25
5	280	70	20	1,0	14,2	23,5	27,2	32	35
3*	280	70	20	-	15,8	23,4	29,5	32,6	34,8

* на свежемолотом цементе

Анализ данных табл.1 показывает следующее: более интенсивную прочность образцы набирают в первые 3-7 сут. твердения и последующее замедление темпов роста; введение миндобавки в цемент, хранившийся 60 сут. взамен 10, 20 и 30 % клинкера снижает ее к проектному возрасту (28 сут.) на, примерно, 7,5 %; 13,6 % и 34,5 % соответственно; для возраста 3 сут снижение составляет: 9 %; 24 % и 50 %, соответственно.

Циклическое насыщение-высушивание

Образцы бетона (кубы с ребром 100 мм) после изготовления пропаривали по режиму: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры за 3 ч до $t \sim 70^{\circ}\text{C}$: изотермический прогрев – 6 ч; остывание в камере 10 ч и после распалубки – 3 ч, после чего их подвергали испытаниям.

Прочность бетона определяли в водонасыщенном состоянии через каждые 5 циклов испытаний.

Данные о кинетике изменений прочности бетона в процессе испытаний приведены в табл. 2.

Исходя из табл. 2 видно, что данные, относящиеся к составу № 5 (бетон приготовлен с пластифицирующей добавкой при снижении расхода воды на 12-15 % относительно состава № 3), в котором равное с составом № 3 содержание клинкерной части в цементе (280 кг) и миндобавки в нем (70 кг) подтверждают эффективность использования пластификатора в бетоне со значительным количеством (~20 % по массе) миндобавки в виде молотого гранитного отсева.

Водопоглощение бетона

Водопоглощение бетона определили по стандартной методике ГОСТ 12730.3-84 с начальным насыщением образцов до постоянной массы и последующим высушиванием до постоянной массы.

Результаты испытаний, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о следующем. С увеличением дозировки миндобавки в цементе до 20 % от массы вяжущего водопоглощение бетона возросло не более, чем на 5 %. Повышение дозировки миндобавки до 30 % от массы цемента сопровождается резким ростом водопоглощения бетона (более 12%).

Таблица 2 – Прочность бетона при циклическом насыщении-высушивании

№ п/п	Характеристики бетона:			Прочность бетона, МПа, после количества циклов:							
	Цемент:		Добавка СП, % от СВ	0	5	10	15	20	25	30	
	Расход, кг	Мин- добавка									
		кг									%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	350	-	-	-	24,7	26	28	28	26	24	22
2	315	35	10	-	22,8	23,0	26,4	25	23	23	20
3	280	70	20	-	22	22,8	22,5	22	21	21	17
5	280	70	20	1,0	25,5	25	25,0	25	24	24	23
7	245	105	30	-	18,0	19,9	22,0	22	21	19	15
3*	280	70	20	-	24,5	24,8	27	27	25	24	21

* на свежемолотом цементе

Таблица 3 – Водопоглощение бетона по массе (W_m , %)

№ п/п	Характеристики бетона			Добавка СП, %	W_m , %	Изменение W_m , % от W_m , бетона без миндобавки (состав № 1)
	Цемент:		Расход, кг			
	Миндобавка:					
	кг	%				
1	350	-	-	-	4,1	-
2	315	35	10	-	4,2	+2,4
3	280	70	20	-	4,3	+4,9
4	245	105	30	-	4,6	+12,2
5	280	70	20	1,0	4,0	-2,4

Таким образом сочетание качественной добавки пластификатора и миндобавки из гранитного отсева позволяет получать бетон, состояние структуры которого по объему и размерам (сечению) капилляров открытой пористости соответствует бетону, приготовленному на бездобавочном портландцементе.

Морозостойкость бетона

В процессе исследований контролировали изменение прочности бетона при введении минеральной добавки.

В табл. 4 приведены данные об изменениях прочности бетона в процессе испытаний на морозостойкость, из которых следует, что бетон составов № 1 и 5 (цемент без миндобавки и с 20 % миндобавки и 1% пластификатора) выдержал 12 циклов ускоренных испытаний или до 300-400 циклов испытаний по базовому методу для бетона общестроительного назначения.

Бетон на портландцементе с минеральной добавкой в 10 % от массы выдержал до 300 циклов, с 20 % - до 250-300 циклов и при 30 % - до 150 циклов.

Коррозионная стойкость бетона в хлоридной среде

Солейстойкость бетона на портландцементе с минеральной добавкой исследовали по изменению прочности бетона в процессе испытаний. Образцы бетона после изготовления пропаривали (по ранее изложенной методике) после чего их подвергали испытаниям. Прочность бетона определяли в насыщенном жидкостью состоянии через каждые 5 циклов испытаний.

С целью ускорения процесса деструкции бетона при испытаниях на солейстойкость и сокращения времени проведения эксперимента образцы бетона после высушивания не охлаждали, а помещали в раствор разогретыми. В этом случае имеет место резкое (жидкостное) охлаждение наружных слоев бетона и в них возникают значительные растягивающие усилия.

Данные о кинетике изменений прочности бетона в процессе испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 4 – Прочность бетона в процессе испытаний

№ п/п	Характеристики бетона:			Добавка СП, % от СВ	Прочность бетона, МПа, через количество циклов:						
	Цемент:				0	2 (75)	3 (100)	4 (150)	5 (200)	8 (300)	12 (400)
	Расход, кг	Миндобавка									
		кг	%								
1	350	-	-	-	25	27	28	29,5	30,5	26	23
2	315	35	10	-	23	25,5	27,5	28,5	26,5	23	21
3	280	70	20	-	22	24,8	27	27	25	21	18
9	245	105	30	-	18	21	22	20	16	-	-
5	280	70	20	1,0	25	28	29	30	30,5	28,5	22

Таблица 5 – Прочность бетона при циклическом насыщении – высушивании

№ п/п	Характеристики бетона:				Прочность бетона, МПа, после количества циклов:						
	Цемент:			До- бавка СП, % от СВ	0	5	10	15	20	25	30
	Рас- ход, кг	Миндобавка									
		кг	%								
а) насыщение в воде											
1	350	-	-	-	24,7	26	28	28	26	24	22
2	315	35	10	-	22,8	23	26,4	25	23	23	20
3	280	70	20	-	22	22,8	22,5	22	21	21	17
6	280	70	20	1,0	25,5	25	25,0	25	24	24	23
б) насыщение в растворе NaCl											
1	350	-	-	-	25	27	28,5	30	30	29	26
2	315	35	10	-	22,8	24	26,5	27	27	26	24
3	280	70	20	-	22	23	25	27	27	26	22
6	280	70	20	1,0	25,5	28	29	30,5	31	31	30

Из табл.5 следует, что результаты, относящиеся к составу № 6 в котором равно с составом № 3 содержание клинкерной части цемента (280 кг) и миндобавки (70 кг) подтверждают эффективность использования пластификатора в бетоне на портландцементе с миндобавкой.

Оценка влияния миндобавки на коррозию арматуры,
при одноциклических испытаниях

В соответствии с положениями стандарта (СТБ 1168-99) при испытаниях образцы партии насыщали питьевой водой до постоянной массы (прирост массы за сутки не более 0,1 %), а затем образец помещали в сосуд испытательной установки, заполненный водой. Далее обрабатывали полученные данные, строили анодные поляризационные графики, анализировали полученные результаты испытаний. Результаты анализа поляризационных кривых одноциклических электрохимических испытаний, выполненных по СТБ 1168-99, приведены в табл. 6.

На их основании можно сделать однозначный вывод о том, что минеральная добавка в цемент в виде порошкообразного (молотого) гранитного отсева не оказывает активирующего воздействия на стальную арматуру в бетоне и не вызывает изменений ее коррозионного состояния в сравнении с бетоном на чистоклинкерном цементе.

Таблица 6 – Результаты одноциклических испытаний (водная среда)

№ п/п	Характеристики бетона					Добавка СП, % от СВ	Состояние арматуры
	Ц	Щ	П	Миндобавка			
				кг	%		
1	350	1150	700	-	-	-	Устойчивое пассивное состояние стали
2	315	1150	700	35	10	-	Устойчивое пассивное состояние стали
3	280	1150	700	70	20	-	Устойчивое пассивное состояние стали
4*	280	1150	700	70	20	-	Устойчивое пассивное состояние стали
5**	280	1150	700	70	20	-	Устойчивое пассивное состояние стали
6	280	1150	700	70	20	1% (3,5кг)	Устойчивое пассивное состояние стали

* состав на цементе после 60 сут. хранения;

** состав на цементе после 90 сут. хранения.

Заключение

В условиях эксплуатации в воде или грунтах приготовление бетона на портландцементе с миндобавкой из молотого гранитного отсева в количестве до 20% от массы вяжущего допустимо, т.к. при этом обеспечивается стабильный рост прочности бетона.

В случае попеременного увлажнения-высушивания введение минеральной добавки в цемент и, особенно, в количестве 20% и более от массы приводит к снижению прочности бетона. Этот отрицательный эффект может быть исключен за счет повышения плотности бетона при снижении водосодержания путем введения пластифицирующих добавок (состав № 5, табл. 8). Без них портландцемент с миндобавкой до 20% от массы не может быть рекомендован к применению в изделиях (конструкциях), работающих в зоне переменного увлажнения-высушивания (причалы, откосы мелиарационных систем и подобное).

Испытания на морозостойкость бетона показали, что в целом бетон на портландцементе с минеральной добавкой из молотого гранитного отсева характеризуется достаточной для изделий (конструкций) общестроительного назначения морозостойкостью, соответствующей в дозировке 20% маркам F200 - F300.

В результате экспериментальных исследований выявлено влияние минеральной добавки в портландцемент в виде молотого гранитного отсева ПРУП «Гранит» на солестойкость бетона в среде хлоридов. Установлено, что бетон на портландцементе с минеральной добавкой в количестве до 20 % от массы вяжущего характеризуется достаточно высокой солестойкостью и не отличается в общих тенденциях от бетона, приготовленного на чистоклинкерном цементе (М500 Д0). Установлено, что введение в портландцемент миндобавки до 20% от МЦ не вызывает изменений в коррозионном состоянии стальной арматуры в бетоне, т.е. сталь находится в пассивном (защищенном) состоянии, а молотый гранитный отсев можно применять в железобетонных изделиях и конструкциях без ограничений, включая преднапряженные и армированные арматурой на основе проволоки.

Методика ускоренного определения морозостойкости

Ловков И.И., Фетисова Е.С.

Научный руководитель – Бондарович А.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Условия эксплуатации элементов благоустройства наших поселений (тротуаров, площадей, переходов и т.п.), устроенных преимущественно из бетонных изделий, изготовленных способом вибропрессования, характеризуются агрессивным воздействием эксплуатационной среды. При этом для Республики Беларусь характерно широкое использование в зимний период антиобледенителей в виде солей хлора. Кроме этого, физико-химическое воздействие эксплуатационной среды дополняется механическими нагрузками: истиранием, ударным воздействием, нагрузками от массы при перемещении технических средств, в том числе при уборке тротуаров и площадей, и пр., что не учитывается при стандартизированной оценке морозостойкости бетона.

Для разработки методики оценки фактического состояния бетона эксплуатируемых покрытий из элементов мощения были проведены опыты, которые установили закономерности изменений прочности, массы образцов, скорости распространения в них ультразвука, истираемости мелкозернистого бетона и бетона со щебнем в зависимости от продолжительности циклических испытаний и дополнительного воздействия статической и динамической (ударной) нагрузкой на бетон.

Методика распространяется на элементы, изготовленные из жестких цементно-песчаных смесей (мелкозернистый бетон средней плотностью 2250...2350 кг/м³, прочностью на сжатие не менее 35 МПа) и цементно-песчано-щебеночных смесей (бетон с крупным заполнителем средней плотностью 2350...2450 кг/м³, прочностью на сжатие не менее 40 МПа) с наибольшим размером зерен заполнителя $D_{наиб.} = 10...12$ мм и содержанием крупного заполнителя до 800 кг в 1 м³ бетона. Методика может быть применена для контроля, оценки и прогнозирования состояния

бетона элементов, отличающихся составом или технологией их получения, с учетом поправочных коэффициентов, установленных для конкретных отличий в составах бетона и влияния их, а также отличий технологии изготовления изделий на свойства бетона.

Методика включает этапы подготовки образцов (изделий) бетона, определение влажности бетона, определение скорости ультразвука, оценку показателя морозостойкости бетона (рисунок 1.(а;б;в;г); рисунок 2.(а;б;в;г)). Образцы отбирают из контролируемых участков покрытия сериями не менее 5 шт. После изъятия из покрытия образцы следует хранить в условиях, предотвращающих испарение влаги, при рекомендуемой температуре воздуха 0...+5 °С (но в любом случае при минимально-возможной положительной). Рекомендуется немедленно после изъятия помещать их в индивидуальные влагоизолирующие пакеты, например, из полиэтиленовой пленки, плотно укрывая поверхность от потерь влаги на период от момента изъятия до начала испытаний.

Контроль состояния бетона образцов рекомендуется осуществлять с минимальным разрывом во времени между их отбором и определением влажности бетона и скорости ультразвука. При изъятии образцов в сухую погоду их (перед определением влажности бетона и скорости ультразвука) водонасыщают по ГОСТ 12730.2-78.

Подготовка образцов (изделий) включает:

- установление вида бетона (мелкозернистый или с крупным заполнителем) осуществляют визуальной оценкой поверхности элементов на наличие характерных для бетона со щебнем «выходов» последнего наружу в поверхностном слое, либо вскрытием (при необходимости) структуры бетона, образцов подвергаемых испытаниям по грани, противоположной их рабочей поверхности, после съема данных о влажности и скорости ультразвука;

- насыщение бетона в 5%-ом растворе NaCl(или в воде) по ГОСТ 10060.0-95.

Поверхность элементов перед выполнением определений влажности и скорости ультразвука должна быть очищена, вклю-

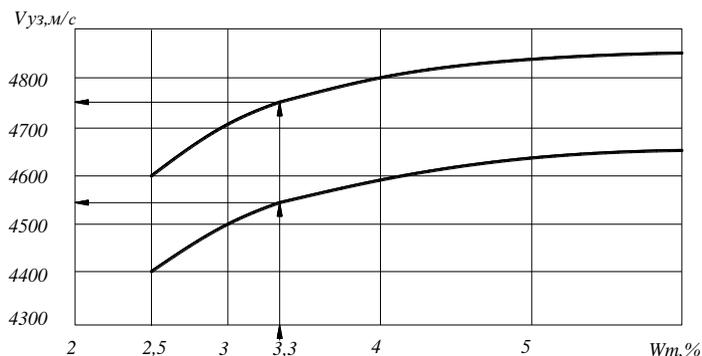
чая возможные остатки продуктов разрушения цементного камня поверхностного слоя бетона и воды. Поверхность бетона может быть влажной, но не должна быть покрыта жидкостью.

Для определения влажности бетона датчик прибора устанавливается на гладкую поверхность элемента, примерно по его геометрическому центру (по продольной оси «вытянутых» элементов). Измерение осуществляют с помощью влагомеров с планарными датчиками для контроля влажности с поверхности (прилегающего к ней слоя бетона), базирующихся на диэлектрическом методе ее измерения (ГОСТ 21718-84); как среднее значение не менее, чем 4-х замеров по граням в центральной части образцов.

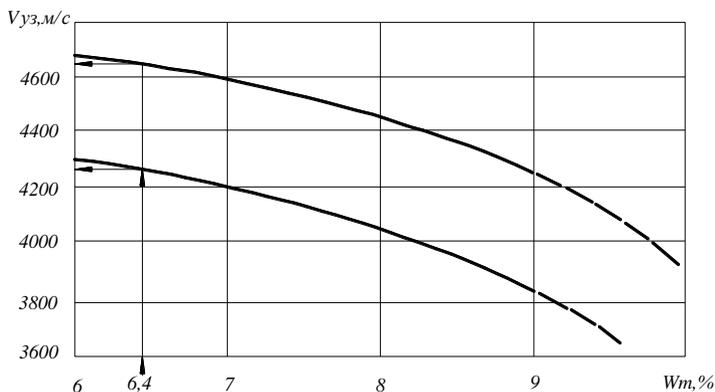
Скорость ультразвука в бетоне определяют с помощью тестеров ультразвуковых, оснащенных датчиками «точечного» приложения с базой (межосевым расстоянием) в 150 мм и измеряющего скорость распространения продольных ультразвуковых волн в слое бетона, прилегающем к поверхности элемента. Возможно использование иных приборов-аналогов, оттарированных в соответствии с паспортной документацией на прибор и положениями ГОСТ 17624-87; как среднее значение не менее, чем 4-х замеров по граням в центральной части образцов. Допускается определять влажность бетона элементов высушиванием по ГОСТ 12730.2-78, но только после определения скорости ультразвука.

Число результативных замеров для определения средней влажности бетона и скорости ультразвука в нем по каждому контролируемому участку должно быть не менее пяти. Под результативными замерами следует понимать такие их значения, которые не отклоняются в большую или меньшую сторону более чем на 5 % при определении влажности бетона и более чем на 10 % при определении скорости ультразвука от среднеарифметических значений этих характеристик, установленных по остальным, но не менее чем по 5 замерам. Эти значения влажности бетона и скорости ультразвука в бетоне являются средними для контролируемого участка и используются в последующих расчетах.

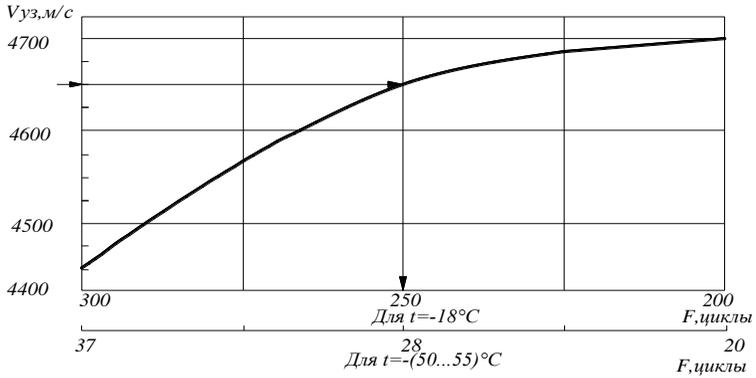
Оценку показателя морозостойкости бетона выполняют, используя установленные величины средних значений влажности бетона (W_{mi} , %) и скорости ультразвука, полученные по результатам замеров на требуемом по ГОСТ 10060.0-95 количестве образцов, и данные рисунка 1. (а; б; в; г) - для мелкозернистого бетона, и рисунка 2. (а; б; в; г) – для бетона с крупным заполнителем. По ним определяют область установленных значений скорости ультразвука и стадию, к которой относится испытываемый бетон по состоянию его структуры.



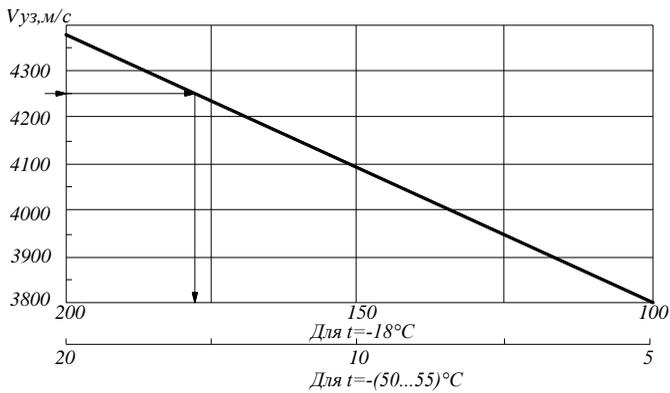
а) Область установленных значений скорости ультразвука ($V_{уз}$ м/с) мелкозернистого бетона в зависимости от влажности (W_m , %) на стадии I .



б) Область установленных значений скорости ультразвука ($V_{уз}$ м/с) мелкозернистого бетона в зависимости от влажности (W_m , %) на стадии II

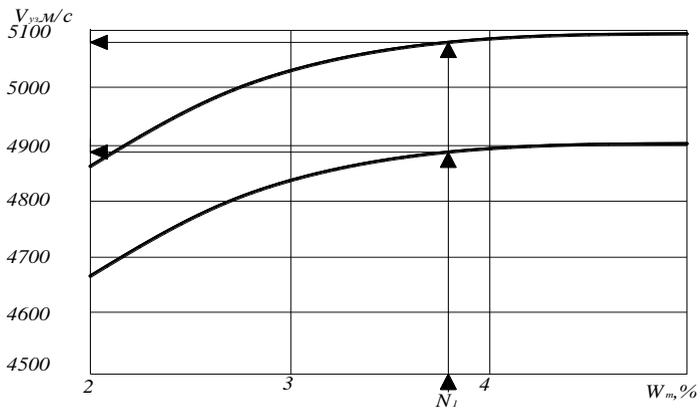


в) Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для мелкозернистого бетона на стадии I

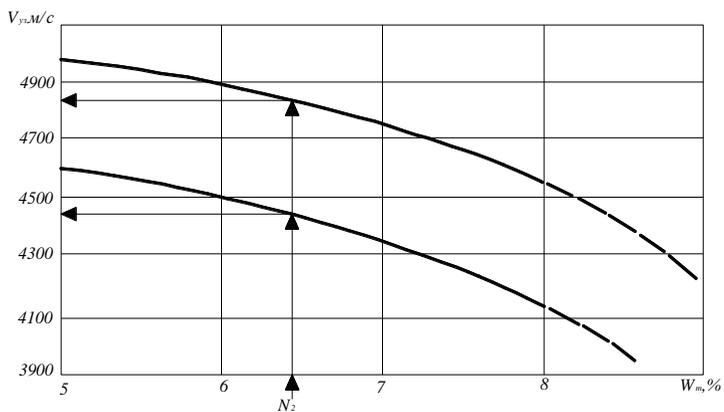


г) Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для мелкозернистого бетона на стадии II.

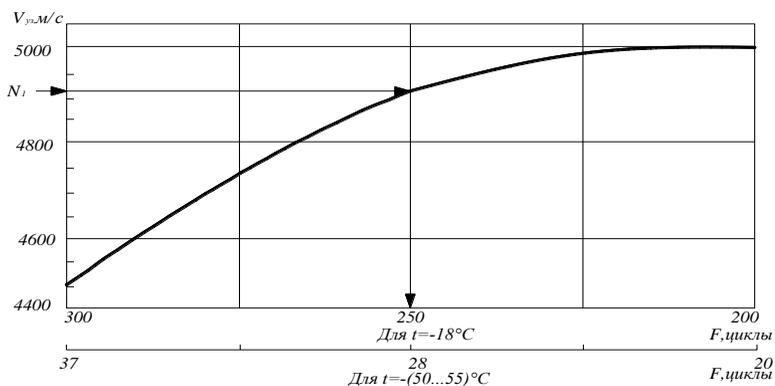
Рисунок 1 – Графические зависимости для оценки морозостойкости вибропрессованного мелкозернистого бетона



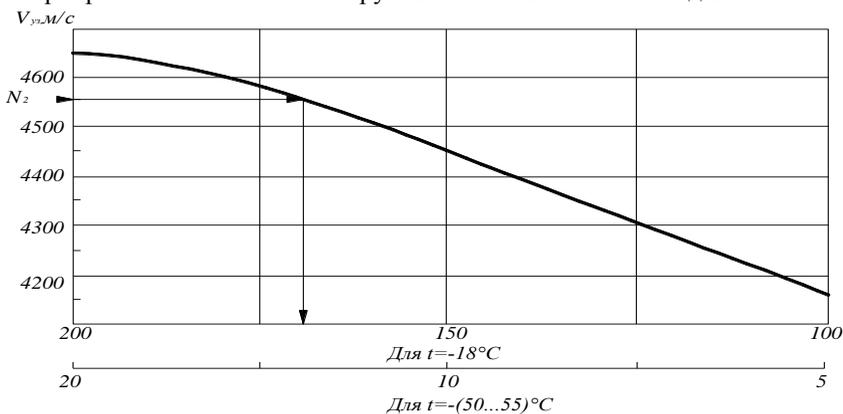
а) Область установленных значений скорости ультразвука ($V_{yз}$ м/с) вибропрессованного бетона с крупным заполнителем в зависимости от влажности (W_m , %) на стадии I.



б) Область установленных значений скорости ультразвука ($V_{yз}$ м/с) вибропрессованного бетона с КЗ в зависимости от влажности (W_m , %) на стадии II.



в) Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного бетона с крупным заполнителем на стадии I.



г) Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного бетона с КЗ на стадии II.

Рисунок 2 - Графические зависимости для оценки морозостойкости вибропрессованного бетона с крупным заполнителем

В настоящей методике стадия I характеризует бетон требуемой плотности, удовлетворяющей требованиям действующих

нормативов по водопоглощению бетона. То есть, объем капиллярной (открытой, сообщающейся) пористости определяемый по водопоглощению по массе бетона мелкозернистого менее 6%, а для бетона с крупным заполнителем - менее 5%. Стадия II характеризует бетон, водопоглощение по массе которого превышает указанные значения.

Для этого вначале возводят перпендикуляр от полученного значения водопоглощения бетона на горизонтальной оси W_{mi} до пересечения с нижней и верхней границей области установленных, соответственно, наименьшего и наибольшего значений (обозначенных на рисунке 1.а (2.а) и 1.б (2.б) сплошными графическими линиями) скорости ультразвука и определяют эти значения $V_{уз}$, проецируя точки пересечения на вертикальную ось.

Используя установленную область значений скорости ультразвука, ограниченную величинами наименьшей ($V_{уз}^{min}$) и наибольшей ($V_{уз}^{max}$) его скорости, соотносят фактическое значение скорости ультразвука с этим диапазоном и оценивают, к какой стадии по состоянию структуры относится испытуемый бетон контролируемого участка, а именно: к стадии I по рисунку 1.а (2.а) или к стадии II по рисунку 1.б (2.б).

Для этого сравнивают величины водопоглощения бетона и среднего значения скорости ультразвука, установленного (фактического, среднеарифметического значения) для оцениваемого количества образцов ($V_{узи}$, м/с), с областью ее значений в пределах:

$V_{уз}^{min} \dots V_{уз}^{max}$, м/с, относящихся к стадиям: I или II.

$$V_{уз.i}^{cp} = 0,5 (V_{уз}^{min} + V_{уз}^{max}), \text{ м/с}, \quad (1)$$

Затем, используя графики и данные рисунка 1.в (2.в) или 1.г (2.г) (в зависимости от установленной стадии, к которой относится бетон по состоянию структуры), и величину среднего фактического значения скорости ультразвука в бетоне образцов $V_{узи}$, м/с, определенную по данным замеров, оценивают показатель морозостойкости бетона для испытательной среды

5% водного раствора NaCl при температуре минус 18° С (базовый метод) или (-50...-55) °С (ускоренный метод).

Для этого проецируют точку с вертикальной оси (рис. 1. в или рис. 1. г), соответствующую величине средней скорости ультразвука в бетоне ($V_{уз}$) до пересечения с графической зависимостью. Последующая проекция полученной точки пересечения на горизонтальную ось дает значение примерного количества циклов стандартных испытаний ($N_{факт}$), после которых состояние структуры бетона соответствует тому, которое характеризует структуру бетона элементов.

В случае, если среднее фактическое значение скорости ультразвука, определенное на образцах бетона, выходит за пределы диапазона «минимального – максимального» значений, то для дальнейшей оценки его морозостойкости используют величину минимального или максимального значения $V_{уз}$, в зависимости от «зоны» выхода фактического значения $V_{уз}^{cp}$ из данного диапазона.

На основании результата оценки морозостойкости бетона испытываемых изделий и сопоставления этих данных с предъявляемым к нему уровнем требований по морозостойкости (марке) делают заключение о соответствии.

В случае, если установленный показатель морозостойкости бетона ниже требуемого, анализируют причины данной ситуации. Оценивают качество использованных материалов (характеристики вяжущего и заполнителя(ей)), рациональность состава бетона (расход материалов, водоцементное отношение, консистенцию (жесткость) бетонной смеси), степень (качество) уплотнения (интенсивность и продолжительность вибровоздействия, давление пригруза и состояние формовочного оборудования в целом), условия и режим твердения бетона (температура, влажность среды, время твердения и др.). На основании результатов анализа выявляют причины, вызвавшие несоответствие морозостойкости бетона требуемому уровню и устраняют их, корректируя параметры технологического процесса изготовления изделий.

Предложенная методика ускоренного контроля (оценки) морозостойкости тяжелого (мелкозернистого и содержащего круп-

ный заполнитель) бетона позволяет за 5 суток определить эту характеристику бетона. Принятый для оценки характеристик испытываемого бетона (изделий) инструментарий неразрушающего контроля для определения влажности бетона и скорости ультразвука стандартизирован и доступен, что обеспечивает возможность ее широкого применения.

Данная методика также опробирована и подтвердила свою эффективность при оценке фактического состояния бетона в процессе эксплуатации покрытий (внедрено на СП «Техинмаш» ООО г. Минска) и ускоренной оценке морозостойкости бетона свежеизготовленных вибропрессованных изделий (внедрено на ОАО «Завод СЖБ-Борисов» г. Борисова, Минской области и ОАО «Минскжелезобетон» г. Минска).

Оценка различных приемов введения углеродных наноматериалов в цементные бетоны

Русак Д.М., Ткаличев Д.А.

Научный руководители – Рябчиков П.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение малых количеств твердофазного вещества УНМ в бетон представляет собой непростую задачу с позиций его равномерного распределения по объему приготавливаемой бетонной смеси, т.к. это нерастворимое в воде вещество. Поэтому, одной из первостепенных задач исследований являлось решение проблемы равномерного распределения малых дозировок вещества УНМ в объеме цемента.

Введение УНМ в бетоны различных видов и технологий приготовления может осуществляться по разным технологическим схемам. В частности:

- путем введения в цемент при последующим использовании модифицированного вяжущего;
- путем введения в бетонную смесь на стадии приготовления;
- с водой затворения;
- либо дозированием УНМ непосредственным распределением;
- путем введения в мелкий заполнитель или минеральную добавку, с последующим смешиванием бетонов плотной структуры, а также и при помоле песка в производстве поризованных (ячеистых) бетонов;
- комбинированными приемами.

Введение УНМ в цемент может осуществляться по двум различающимся схемам: на стадии производства вяжущего и на стадии потребления.

Введение УНМ на стадии производства цемента предполагает дозирование и подачу вещества УНМ при помолу портландцементного клинкера на заводах-производителях вяжущего. Учитывая малые дозировки вещества УНМ подача должна осу-

ществляться не «точечным» вбросом, а путем распределения по значительной площади зоны загрузки клинкера в помольный агрегат. Например, путем эжекции, т.е. направленного распыления вещества УНМ с помощью сжатого воздуха по загружаемому слою клинкера.

Введение УНМ на стадии потребления цемента целесообразно осуществлять двумя различающимися способами.

Во-первых, предварительным смешиванием цемента и УНМ в высокоскоростных смесительных установках принудительного принципа действия (лопастных; пружинных; с вращающимися валами и др.) с последующим дозированием модифицированного цемента для приготовления бетонной смеси.

Во-вторых, предварительным домолом цемента с веществом УНМ в помольных агрегатах, что обеспечивает не только эффект от введения УНМ, но и активизирует исходное вяжущее вещество, повышает его активность.

Введение УНМ в бетонные (растворные) смеси может осуществляться тремя различающимися вариантами:

- непосредственное введение (всыпание; а предпочтительно – эжекция сжатым воздухом) отдозированного вещества;
- введение его с водой затворения;
- введение после предварительного смешивания с мелким заполнителем (песком) или с микрокремнеземом (при использовании этой добавки).

При непосредственном введении УНМ в смеситель целесообразно применять вариант эжекции вещества, создавая условия распыления его в замкнутом объеме смесителя по возможно большой площади поверхности перемешиваемой бетонной смеси.

При введении с водой затворения необходимо интенсивно смешать вещество УНМ с отдозированной на замес водой, что предпочтительно осуществлять в эмульгаторах ультразвукового принципа действия (используя эффект кавитации) или механических эмульгаторах перед ее поступлением в смеситель.

При введении с мелким заполнителем (песком) или микрокремнеземом необходимо предварительное смешивание вещества УНМ с, отдозированными на замес компонентами. Воз-

можно смешивание непосредственно в бетоносмесителе при эжектировании или ином варианте равномерной подачи вещества УНМ в процессе перемешивания его с песком, как начальной фазы процесса приготовления бетонной смеси.

Одной из задач исследований являлось решение проблемы равномерного распределения малых дозировок: 0,1...0,001% от массы цемента, вещества УНМ в объеме цемента (цементного теста, раствора, бетона).

Вариант 1. Предварительное смешение сухого вяжущего с сухим порошкообразным веществом в скоростных лопостных минисмесителях.

Вариант 2. Введение суспензионных и сухих порошкообразных УНМ в воду и образование суспензии в объеме воды затворения цемента (раствора, бетона) путем интенсивного перемешивания (эмульгирования) перед введением жидкости в цемент (раствор, бетон).

Этот прием целесообразно осуществлять в эмульгаторах ультразвукового принципа действия, эффективность которых базируется на проявлении эффекта кавитации, что способствует глубокому диспергированию частиц твердой фазы.

Вариант 3. Предварительное смешение вяжущего с сухим порошкообразным веществом путем совместного домола в шаровой лабораторной мельнице.

Вариант 4. Введение сухого порошкообразного УНМ в цемент (раствор, бетон) путем «эжекции», т.е. факелообразным направленным распылением с помощью сжатого воздуха в процессе перемешивания смеси.

Вариант 5. Введение УНМ с песком, применяемым в качестве заполнителя или наполнителя (пенобетон) или в качестве вяжущего кремнеземистого компонента (газобетон).

Сравнительная проверка показала примерное равенство всех 5-ти вариантов и их разновидностей, т.е. они обеспечивают достаточно равномерное распределение вещества УНМ в объеме (цементного камня, раствора, бетона).

При этом наиболее благоприятен и (при возможности осуществления) предпочтителен совместный домол УНМ с цементом (вариант № 3), т.к. совместный домол одновременно активи-

визирует вяжущее и способствует росту прочности цементного камня (раствора, бетона), в сравнении с остальными приемами введения УНМ.

Одновременно оценивалась эффективность тех или иных разновидностей УНМ, полученных и подготовленных в институте тепло-массообмена (ИТМО НАН Беларуси).

Параллельно обрабатывали режимы твердения, как ускоренные, при повышенной температуре (до 50...850С) и влажности (до 90-100%), так и естественные (при температуре (20+5)0С в условиях стандартной (> 90%) и естественной ~ (60...70%) влажности воздуха среды твердения.

Критерием для оценки результатов испытаний во всех случаях принята прочность на сжатие, а для мелкозернистого бетона (цементно-песчаного раствора) – на растяжение при изгибе и сжатии, выраженные либо абсолютных значениях (МПа) или в относительных величинах (%).

Порошкообразные вещества добавки УНМ дозировали на электронных весах типа ВЛК-500 с погрешностью «± 0,01» г. В цемент их вводили в сухом виде при интенсивном механическом перемешивании в лопастном минисмесителе в течение 10 мин. Затем вводили воду затворения и, в соответствии с положениями действующего стандарта, на испытания цемента непрерывно перемешивая в течение 5 минут. Количество воды затворения подбирали таким образом, чтобы получать тесто нормальной густоты.

Из теста нормальной густоты изготавливали образцы-кубы (20x20x20 мм), которые формовали вручную с помощью штыковки Ø 3 мм и уплотняли на встряхивающем столике (количество ударов - 25) по ГОСТ 310-76(88).

Режимы твердения образцов охватывали диапазон: от нормально-влажностных условий до прогрева при температуре t~80...85⁰С, включая низкотемпературный прогрев при температуре t~50⁰С. Эти варианты твердения соответствуют основным практикуемым температурным режимам твердения как сборных, так и монолитных строительных бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Добавки УНМ вводили в цемент в виде суспензии вместе с водой затворения (после предварительного интенсивного механического смешивания с водой). Прочность определяли на цементных образцах-кубах 20х20х20 мм, изготовленных по ранее изложенной методике. Режимы твердения цементного камня – нормально - влажностные.

Методика изготовления цементно-песчаного бетона включала операции:

- взвешивание составляющих: цемент, песок, вода, УНМ;
- высыпая песок в емкость, добавляем в него УНМ (по всей поверхности), перемешиваем песок с УНМ лопаткой (20 сек), затем перемешиваем интенсивно (дрелью) в течении 3 минут;
- добавляем в смесь песка с УНМ цемент, перемешиваем лопаткой (20 сек), затем интенсивно (дрелью) – 2 мин;
- высыпая полученную смесь в другую емкость с водой и перемешиваем интенсивно (дрелью) 1 мин., перемешиваем смесь лопаткой (20 сек), затем еще раз интенсивно (дрелью) – 30 сек;
- высыпая полученную смесь в чашу (протертую влажной тряпкой) и перемешиваем лопаткой – 3 мин;
- укладываем смесь в форму и вибрируем на виброплощадке 3 мин., заглаживаем поверхность образцов;
- тепловая обработка: выдержка – 2...3 часа; прогрев при 50⁰С 2...3 часа; остывание в термостате до утра (примерно 15 часов);
- испытание образцов в пределах 24 ч от момента изготовления.

Состав бетона: цемент 550 г; песок 1650 г; добавка SicaViscocrete - 0,3% (от массы цемента); В/Ц 0,36.

Одним из направлений исследований является установление эффективности применения УНМ в поризованных (ячеистых) бетонах (газо- и пенобетонах). При их получении используют молотые кварцевые пески (кремнеземистое вяжущее для газобетона) или иные молотые наполнители (пенобетон). В этой связи было необходимо оценить влияние УНМ на процесс диспергации (помола в шаровой мельнице) песка, как компонента,

вяжущего для газобетона. Одновременно помол даст возможность равномерного распределения вещества УНМ в объеме измельчаемого материала.

В шаровой мельнице измельчали навеску сухого песка в количестве 5 кг, вводя 25 г нанодобавки (0,5 % от массы песка) перед помолом. Удельную поверхность продукта помола периодически определяли с помощью прибора типа «ПСХ-4» по воздухопроницаемости навески (10 г) измельчаемого материала (прочие условия – одинаковы).

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Введение в цемент (бетон, раствор) целого ряда из полученных в ИТМО НАН Беларуси углеродных наноматериалов (УНМ) обеспечивает рост прочности цементного камня (бетона, раствора) как в условиях естественного (нормально-влажностного) твердения, так и в случае ускоренного твердения при тепловой обработке образцов.

2. На уровень прироста прочности цементного камня (бетона, раствора; в отдельных случаях достигавшего 40...70 %), оказывает основное влияние вид (состав) УНМ и дозировка вещества. Последняя для «классических» УНМ примерно соответствует ~ 0,05% от массы цемента и изменяется, ориентировочно до 0,10% от массы цемента, для менее качественных веществ УНМ.

3. Все проверенные способы введения вещества УНМ и их разновидности могут быть реализованы при производстве бетонных смесей (бетонов, растворов). При тщательной проработке (проектной, технической, исполнительной) технологии введения тем или иным способом возможно обеспечение равномерного распределения УНМ в объеме смеси, что подтверждается примерным равенством увеличения прочности цементного камня для различных способов введения (смешиванием с цементом, песком и эмульгированием в воде затворения).

4. Рекомендации по применению способа введения УНМ для конкретных условий производства могут быть сведены к следующему.

4.1. В случае производства цементов, модифицированных УНМ, их следует водить при помоле клинкера.

При возможности организации и экономической целесообразности домола цемента перед приготовлением бетонов (растворов) – это наиболее эффективный вариант модификации вяжущего за счет применения УНМ.

4.2. При введении УНМ в приготавливаемую тяжелую бетонную (растворную) смесь рекомендуется метод предварительного смешивания вещества УНМ с мелким заполнителем (песком). Частицы УНМ «адсорбируются» на поверхности зерен песка и благодаря этому равномерно распределяются в объеме приготавливаемой бетонной (растворной) смеси.

4.3. При подготовке (помоле) наполнителя для пенобетонов или кремнеземистого компонента вяжущего для газобетонов вещество УНМ целесообразно вводить в начальной стадии помола материалов в соответствии с общей технологией получения таких бетонов.

4.4. Наименее эффективно введение УНМ в бетонную (растворную) смесь с цементом или водой затворения на стадии ее приготовления. Эти приемы могут быть реализованы только в случае тщательного предварительного смешивания УНМ с цементом в скоростных смесителях и при эмульгировании воды с УНМ под каждый замес смесителя.

4.5. Во всех случаях рекомендуется экспериментальная проверка эффективности применяемого варианта введения УНМ в бетон (раствор) путем установления требуемых характеристик материала (например, прочности).

Литература:

1. Артамонова, О.В. Формирование структуры и управление прочностными свойствами гидросиликатных систем, модифицированных ультра- и наноразмерными частицами / О.В. Артамонова, Д.Н. Коротких, Е.М. Чернышев // Первая международная конференция: Деформация и разрушение материалов, Москва, 13-16 ноября 2006, тез. докл. Москва, 2006, с. 514-516.

2. Королев, Е.В. Модифицирование строительных материалов нанокремнеземными трубками и фуллеренами / Е.В. Королев,

Ю.М. Баженов, В.А. Береговой // Строительные материалы - Наука. – 2006. – № 8. Приложение к научно-техническому журналу «Строительные материалы», 2006, №9, с. 2-4.

3. Лотов, В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий. / Строительные материалы. – 2006, №8. - с. 10-12.