

противоморозного и пластифицирующего действия. Контроль качества бетонной смеси, укладываемой в скважину, осуществляли путем отбора пяти проб из каждой поступающей на строительную площадку партии бетонной смеси с изготовлением из них трех контрольных кубиков и последующим их испытанием на сжатие (проектный класс бетона С25/30). Результаты испытаний сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний прочности на сжатие бетонных кубиков

№ П/П	№, дата акта отбора проб	Наименование конструкции	Требуемая прочность по ТНПА, МПа	Фактическая прочность испытанных образцов, МПа	Среднее значение прочности, МПа
1	№ 1	Бнс № 1,2,3,4,5,6		39,0	39,4
	Контр. обр. бетона – 3 шт.			39,7	
				36,1	
2	№ 2	Бнс № 15,18,24,29,31		41,6	40,1
	Контр. обр. бетона – 3 шт.			38,2	
				38,5	
3	№ 3	Бнс № 67,96,85	Не менее 38,6	39,2	38,6
	Контр. обр. бетона – 3 шт.			36,3	
				38,0	
4	№ 4	Бнс № 90,91,96		40,4	40,2
	Контр. обр. бетона – 3 шт.			38,5	
				39,9	
5	№ 5	Бнс № 101,105		39,0	39,4
	Контр. обр. бетона – 3 шт.			38,2	
				39,7	

В ходе лабораторного исследования установили, что испытанные образцы бетона соответствуют классу бетона по прочности С25/30 согласно СТБ 1544–2005.

Использование «Хидетал-ГП-9» дельта» позволяет при повышении подвижности бетонной смеси с П1 до П5 производить бетонные работы при отрицательных температурах окружающего воздуха согласно ГОСТ 24211–2008. Эффективность действия добавки обусловлена комплексным взаимодействием с бетонной смесью:

- за счёт использования эфиров поликарбоксилатов, снижается водоцементное соотношение. Это приводит к тому, что до момента понижения температуры бетонной смеси ниже 0° С, максимально возможная часть воды вступает в реакцию гидратации с цементом и находится в связанном состоянии;

- ускоряющие компоненты, входящие в состав добавки, обеспечивают крайне интенсивный набор первоначальной прочности, что увеличивает теплоту гидратации цемента и позволяет добиться критической прочности в кратчайшие сроки;

- не «солевые» компоненты добавки, вступающие в реакцию с оставшейся свободной водой, образуют соединения электролитического типа и препятствуют её замерзанию до – 20 °С.

В ходе выполнения работ также было установлено, что при использовании пластифицирующего эффекта снизилось время вибропогружения арматурного каркаса, облегчив уплотнение бетона. К преимуществам применения данной добавки можно отнести: низкую дозировку; отсутствие необходимости дополнительной операции по разведению; сохранность эффективности при хранении до –30 °С, что позволяет использовать добавку на открытых площадках; значительное сокращение расхода цемента с выходом на марочную прочность за счёт высокой водоредуцирующей способности; снижение водоотделения и расслоения на высокоподвижных смесях; повышение водонепроницаемости и морозостойкости бетона.

УДК 621.762; 691.002(032)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВЕЩЕСТВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ

П. В. РЯБЧИКОВ, Э. И. БАТЯНОВСКИЙ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

С 2006 г. в БНТУ были начаты системные исследования на базе кафедры «Технология бетона и строительные материалы» и ее научно-исследовательской лаборатории по направлению эффектив-

ного использования углеродных наноматериалов (УНМ) в строительной отрасли. В результате многочисленных экспериментов был выделен ряд углеродных нановеществ, которые отличаются вещественным составом, способом получения, очистки и введения в цементные (бетонные) композиции. С помощью данных видов УНМ удалось добиться увеличения различных физико-технических свойств (прочностных, технологических, эксплуатационных) цементного камня и, на его основе, бетона.

С позиций эффективного воздействия УНМ на процессы структурообразования, твердения и на прочность цемента особую значимость имеют высочайшая потенциальная энергия ультрадисперсных УНМ, а также их свойство в определенных условиях получения формировать тончайшие волокна значительной (до десятков микрон) длины.

В первом варианте эффективность введения вещества УНМ в цемент и цементные композиции в целом основывается на понижении энергетического порога начала образования кристаллогидратов из водного раствора, насыщенного ионами клинкерных минералов цемента, как результата его взаимодействия с водой затвердения. То есть, в этом случае используется высокий уровень энергии поверхности частиц УНМ, которые могут служить центрами кристаллизации, ускоряя процесс образования кристаллогидратов и обеспечивая повышенные темпа роста прочности цементного камня.

В несколько ином аспекте проявляется эффективность волокнообразных трубчатых УНМ. Их особенностью является значительная длина (до 30 мкм) при малых размерах поперечного сечения, которое может быть в диаметре менее 1 нм. Малые поперечные размеры нановолокон при длине, значительно превышающей размеры собственно гидрокристаллов силикатов, алюминатов и ферритов кальция, соответствующих ~ 30–250 нм, обеспечивают необходимые предпосылки для «защемления» волокон в межщельных пространствах соседствующих поверхностей множества гидрокристаллов, что и обеспечивает эффект армирования нано- и микроструктуры объема новообразований затвердевшего цементного камня.

Введение в цемент потенциально активного вещества УНМ может вызвать изменения как в развитии реакций его взаимодействия с водой, так и в образующихся при этом продуктах гидратации. С целью проверки данного предположения были выполнены комплексные исследования проб затвердевшего цементного камня методом термического разложения (детермического анализа) и методом рентгенодифракционного (рентгеноструктурного) анализа, а также определение его прочности.

На основании результатов исследований проб цементного камня в совокупности можно сделать вывод о том, что влияние вещества УНМ на твердеющий цемент базируется на физических явлениях, которые способствуют росту прочности цементного камня на разных стадиях его твердения. Вещество УНМ с одной стороны катализирует гидратационный процесс и становление кристаллогидратной структуры цементного камня в качестве «центров кристаллизации» (вершины, изломы трубки, задирающие высокие «точечным» энергетическим потенциалом), а с другой – благодаря созданию кристаллогидратной структуры новообразований за счет «встраивания» (защемления) волокон УНМ в ней, активная размещенные этих волокон в объемах пор между спонтанно формирующейся системой из гидрокристаллов новообразований. Влияние УНМ первого рода в итоге способствует повышению темпа роста прочности во времени, а второго – ее общего уровня – за счет «наноармирования» и усиления способности структуры новообразований и цементного камня (бетона) в целом сопротивляться разрушающей нагрузке.

При проведении исследований цементного камня по установлению оптимальных видов и дозировок УНМ, были осуществлены эксперименты с целью изучения закономерностей влияния углеродных наноматериалов на эксплуатационные свойства различных бетонов, таких как водопоглощение и водонепроницаемость, воздухопроницаемость, стойкости в растворах солей NaCl и Na_2SO_4 , и др.

Были взяты составы бетонов характеризующиеся различной прочностью (60–120 МПа), расходом цемента (480–550 кг/м³), разнообразием крупного заполнителя (щебень, гранитный традиционный и кубовидный), водоцементным отношением (0,23–0,35) и наличием (отсутствием) в составе микрокремнезема и каменной муки (молотый гранитный щебень), использовали различные разновидности УНМ.

В Таблице 4 приведены (частично) основные характеристики мелкозернистого и высокопрочного бетонов, модифицированных углеродными нановеществами.

Таблица 1 – Характеристики бетонов с УНМ

Характеристика бетона	Размерность	Величина в проектном возрасте		Повышение показателя, %
		без УНМ	с УНМ	
Мелкозернистый бетон				
Прочность на сжатие	МПа	55–74	67–82	11–21
Прочность на осевое растяжение (раскалывание)	МПа	1,45–1,67	1,54–2,17	6–30
Прочность на растяжение при изгибе	МПа	9,1–11,9	9,9–13,9	9–17
Водопоглощение	%	3,9–4,0	3,6–3,7	–(7–8)
Высокопрочный бетон				
Прочность на сжатие	МПа	80–100	88–115	10–15
Модуль упругости	МПа $\times 10^3$	45–47	46–49	2–4
Водопоглощение	%	2,0–2,8	1,9–2,7	–(3,5–5,0)
Солестойкость после 10 циклов в насыщенных растворах:				
NaCl – Δm	%	2,5–2,6	2,3–2,5	–(4–8)
NaCl – f_{cm}	МПа	75–83	91–104	21–25
Na ₂ SO ₄ – Δm	%	2,5–2,7	2,3–2,5	–(7–8)
Na ₂ SO ₄ – f_{cm}	МПа	74–79	89–102	20–29
Водонепроницаемость	марка	W16–W18	W18–W20	1 марка

Результаты комплексных экспериментально-теоретических исследований показали, что воздействие углеродных наноматериалов на процессы взаимодействия цемента с водой, твердения, формирования структуры и прочностных свойств цементного бетона имеет физическую природу и не изменяет морфологию кристаллогидратных новообразований затвердевшего цемента.

Результаты механических испытаний бетона на сжатие, растяжение при изгибе и осевое растяжение (путем раскалывания образцов (в статье не приведены)) показали, что в последнем случае прирост прочности бетона (на примере мелкозернистого) более значителен, что подтверждает теоретическую предпосылку о «наноармировании» кристаллогидратной структуры цементного камня в бетоне за счет «встраивания» в неё волокнообразных УНМ, способствующих восприятию растягивающих усилий, возникающих в раскалываемых образцах.

Общая оценка свойств бетона с УНМ подтверждает его перспективность к применению в мелкозернистых и тяжелых бетонах, бетонах дорожных, аэродромных покрытий, а также при изготовлении сборных изделий и в варианте монолитного строительства несущих конструкций, сооружений транспортных коммуникаций.

УДК 539.3

НЕОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕРМОСИЛОВОЕ НАГРУЖЕНИЕ КРУГОВОЙ ПЛАСТИНЫ В СВОЕЙ ПЛОСКОСТИ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ, А. В. НЕСТЕРОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для описания кинематики пакета принята гипотеза «прямой нормали»: в пластине толщиной h нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол, составляющий с радиальной и тангенциальной осями величины $\psi(r, \varphi)$ и $\psi_\varphi(r, \varphi)$. Деформации малые. Проекция внешней нагрузки на радиальное и тангенциальное направления обозначим $p_r(r, \varphi)$, $p_\varphi(r, \varphi)$. В этом случае перемещения в пластине выражаются через две искомые функции: u_r , u_φ .

На границах склейки слоев перемещения непрерывны. На торце пластины предполагается наличие жесткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоев ($\psi_r = 0$ при $r = r_0$), но не мешающих деформированию из своей плоскости.

Постановка задачи проводится в цилиндрической системе координат r, φ, z . Срединную плоскость заполнителя примем за координатную, ось z направим ей перпендикулярно вверх, к слою 1. В этом случае перемещения в слоях выражаются через пять искомых функций $u_r, u_\varphi, \psi_r, \psi_\varphi, w$: