

Батяновский Э. И., доктор технических наук, профессор,
Рябчиков П. В., младший научный сотрудник, **Якимович В. Д.**,
кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный
технический университет, Минск, Беларусь

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЦЕМЕНТНОМ БЕТОНЕ

THEORETICAL PREMISESES AND EFFICIENCY OF THE USE CARBON NANOMATERIALS IN CEMENT CONCRETE

В статье приведена информация о начале развития, состоянии и перспективах применения в строительной отрасли Беларуси нанотехнологий на основе отечественных углеродных наноматериалов, полученных в институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.

The information about the beginning of development, the state and the prospects for application in the construction branch of Belarus nanotechnology on the basis of the domestic carbon nanomaterials, obtained in the institute of Heat and Mass Transfer of NAS of Belarus is given in the article.

ВВЕДЕНИЕ

Для бетонов на цементном вяжущем из множества факторов, влияющих на процессы становления их свойств, определяющим является образование, накопление и системное взаиморасположение гидрокристаллов силикатной, алюминатной и ферритной составляющих портландцементного клинкера, образующихся в результате их реакций с водой затвердения.

Прочностные и упруго-деформативные характеристики цементного камня и бетона предопределяются уровнем энергии их взаимосвязей, которые формируются между соседствующими гидрокристаллами. Учитывая наноразмеры гидрокристаллов ($\sim 8 - 25 \times 10^{-9}$ м), специфику их образования и последующего формирования гидрокристаллической структуры цементного камня,

возможно предположить эффективность введения в такую систему твердофазных частиц иного, в частности, углеродного наноматериала (УНМ). При этом возможно проявление эффективности двоякого рода: во-первых, ультрамикродисперсный углеродный наноматериал, характеризующийся огромным, концентрированным в нанобъеме потенциалом поверхности может послужить катализатором процесса образования гидрокристаллов как более интенсивно (ускоренно) во времени, так и в значительно большем количестве; во-вторых, введение углеродных наноматериалов в виде волокон (нитей) может способствовать проявлению армирующего эффекта на наноуровне, т.е. в формирующейся системе гидрокристаллических новообразований в объеме твердеющего цементного камня. В обоих случаях (но по различающимся схемам проявления эффекта) возможно повышение прочностных характеристик цементного камня, а на этой основе – бетона.

Для проверки выдвинутых гипотез в 2006 г. были начаты системные исследования, которые осуществляются совместно с институтом тепло- и массообмена НАН Беларуси и Белорусским национальным техническим университетом на базе кафедры «Технология бетона и строительные материалы» и ее научно-исследовательской лаборатории. В материале статьи частично представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований проблемы, сделана попытка дать оценку общего состояния и перспектив развития нанотехнологий в строительном материаловедении.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Открытие фуллеренов (Kroto, 1985), развитие технологий их получения и исследований строения, структуры и свойств в 1985-1995 г.г. (Kraetschmer, Ebbesen, Mintimire, Елецкий, Смирнов, Hamada, Sawada, Oshijama, Iijima, Ichihashi, Dresselhaus и многие другие исследователи [1-16 и др.]) позволило выявить (Iijima, 1991), что в результате термического распыления графитового анода в электрической дуге наряду с молекулами, принадлежащими к семейству фуллеренов, образуются также протяженные структуры, представляющие собой свернутые в однослойную или многослойную трубку графитовые слои. Длина таких образований,

получивших название “нанотрубки”, зачастую превышает 1 мкм (т.е. > 1000 нм) и может достигать десятков микрон, на несколько порядков превышая их диаметр, составляющий обычно от одного до нескольких нанометров. Как показали наблюдения, выполненные с помощью электронных микроскопов, нанотрубки состоят из одного (однослойные) или нескольких графитовых слоев: либо вложенных один в другой, либо навитых на общую ось (рис. 1).

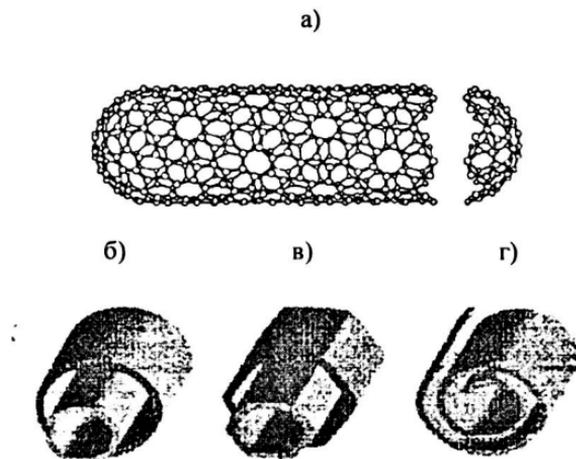
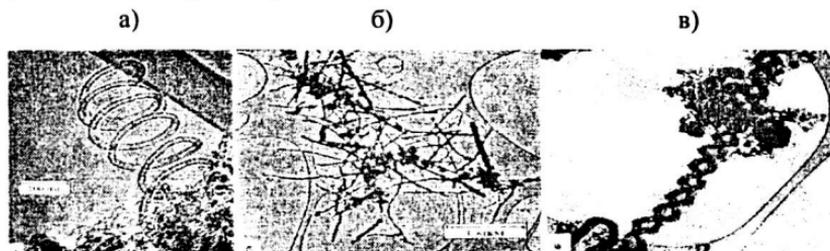


Рис. 1 Идеализированные модели: а) однослойной нанотрубки; многослойных нанотрубок: б) – «русская матрешка»; в) – шестигранная призма; г) – свиток

В процессе развития технологий получения углеродных наноматериалов [17-38 и др.] была выявлена множественность видов строения и размеров формирующихся в различных условиях наноструктур, полученных различными методами с использованием различных материалов, подвергавшихся разным способам модификации, разными приемами и веществами дополнительно обработанных (рис. 2).



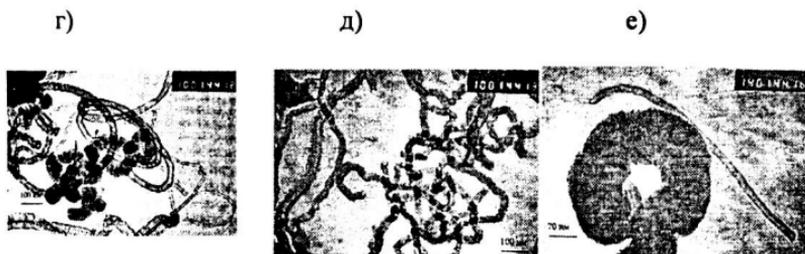


Рис. 2. Электронные фотографии структур углерода а, б, и в образующихся в результате электролитического разрушения графитного катода, г, д и е полученного в ИТМО НАН Беларуси в дуговом разряде.

Изменчивость форм, структурирования (конфигураций) и размеров неизбежно сопровождается непостоянством свойств углеродных наноматериалов. Этот эффект усиливается изменчивостью соотношения образующихся в УНМ параллельно с много- и одностенными нанотрубками, разнообразными многогранниками и нановолокнами иных материалов: аморфного углерода, металла, ультрадисперсных наночастиц. Общим недостатком первоначально разрабатываемых технологий был низкий выход собственно углеродного наноматериала, что сопровождалось соответствующим ростом его себестоимости и позволяло производить УНМ только для исследовательских целей.

В стремлении увеличения «выхода» УНМ, снижения его себестоимости и с целью обеспечения устойчивого качества (однородности) углеродных наноматериалов исследователи разных стран предложили множество вариантов технологий их получения и модификации, которые базируются на следующих основных способах: синтез УНМ в другом разряде [4], лазерную абляцию углерода [18] и процесс химического осаждения в газовой фазе [16] (CVD). Одновременно перечисленные способы характеризуются низким выходом целевого материала (не превышает 0,5 г/час) при высоком содержании в получаемых наноматериалах нейтрального (аморфного) углерода (до 90 %).

Результатами исследований по означенной проблеме, выполненных в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, явилась разработка уникального способа их получения в плазме высоковольтного разряда [19] и создание соответствующего оборудования для реализации технологии про-

изводства УНМ [37]. Дальнейшее ее совершенствование позволило запатентовать способ получения углеродного наноматериала [38] в плазме высоковольтного разряда атмосферного давления (ВВРАД), с производительностью установки ВВРАД при оптимальном составе газовой смеси до 5,0 – 5,5 г/час.

Степень «чистоты» и качества полученного УНМ подтверждает сравнение микрофотографий, представленных на рис. 2 на которых: а, б, в и г – неочищенный углеродный наноматериал, рис. 2д, е - полученный с очисткой по технологии, разработанной в Институте тепло- и массообмена. Очевидна общность строения, конфигураций и типоразмеров неочищенных УНМ, полученных в разных странах, в разное время и отличающихся способами (фотографии УНМ рис. 2. а, б, в – электролитический способ; г, д, е – в плазме высоковольтного разряда), что свидетельствует об общности физико-химической сущности получаемого материала и, следует ожидать, их основных свойств.

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИКЛАДНОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Отдельным направлением эффективного использования углеродных наноматериалов может стать строительная отрасль, с ее огромным разнообразием применяемых в строительном производстве материалов. Технологии их получения настолько разнообразны по химико-физическим процессам, диапазону температурных и временных режимов производственных процессов, что нет возможности на данном этапе точно определить наиболее эффективные направления использования уникальных свойств УНМ, способные обеспечить положительный результат в кратчайшие сроки.

Следует отметить, что интерес к использованию нанотехнологий и ультрадисперсных твердофазных материалов в строительном материаловедении в целом активно проявляется, что отражено в последние годы в целом ряде публикаций различных авторов [39-46 и др. источники]. Вместе с тем, публикуемые по проблеме материалы не отражают и не содержат данных исследований о применении в рассматриваемых в них технологиях (или их аспектах) собственно углеродных наноматериалов.

В этих трудах в основном изучаются и отражаются закономерности становления структуры различных строительных материалов, включая цементные бетоны, на уровне наноразмеров. То есть рассматриваются физико-химические явления, естественно присущие исследуемым в этих работах процессам твердения неорганических вяжущих материалов. Особенностью являются применяемые при этом вещества и приемы активации или модификации структурообразования и свойств материалов, например, путем электрофизической обработки воды [39], введения тонкодисперсных веществ, содержащих кремнеземистые и иные компоненты [41,44,46], путем диспергирования исходных материалов с целью образования и проявления эффекта от частиц «наноразмеров» [40] и т.д. Отдавая должное значимости и полезности выполняемых исследований в области нанотехнологий как таковых, отметим необходимость изучения возможного влияния собственно вещества УНМ на процессы, обеспечивающие получение разнообразных строительных материалов, формирование их структуры и свойств.

Теоретические аспекты эффективности УНМ. С позиций эффективного воздействия УНМ на процессы структурообразования, твердения и на прочность цемента (соответственно, – цементного бетона, как базового строительного материала) особую значимость имеют высочайшая потенциальная энергия ультрадисперсных УНМ и 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 затворения. То есть, в этом случае используется высокий уровень энергии поверхности частиц УНМ, которые могут служить центрами кристаллизации, ускоряя процесс образования кристаллогидратов и обеспечивая повышение темпа роста прочности цементного камня. По классификации Ратинова-Розенберг [47] такие вещества относят к добавкам третьего класса (кристаллические затравки). Их эффективность известна (добавки-кренты) с 60-ых годов ХХ

века [48] и в наибольшей мере реализуется в современных условиях при использовании микрокремнезема [49,50]. Однако при этом дозировка или расход данной добавки составляет ~ 10 % от массы цемента (МЦ) и, для обеспечения максимальных результатов, достигает 30 % от МЦ.

Особенность и уникальность применения вещества УНМ, характеризующегося огромным потенциалом поверхности ультрадисперсных частиц, заключается в достижении (как это будет показано далее) положительного результата, выраженного ростом прочности цементного камня, при дозировках в сотых и даже тысячных долях процента от массы цемента.

Их эффективность обеспечивается благодаря тому, что удельная поверхность открытых и закрытых нанотрубок, определенная методом физической сорбции «N₂» при T = -196 °С, оказалась равной 21 и 36 м²·г⁻¹ соответственно и достигает 450 м²·г⁻¹, для внутренней поверхности структур из нанотрубок [31,36]. Следует ожидать, что удельная поверхность коротких трубок или сферообразных многогранников УНМ будет не менее 450 м²·г⁻¹, а такие частицы характеризуются значительным, сосредоточенным в малом объеме, зарядом поверхностной энергии.

В несколько ином аспекте проявляется эффективность волокнообразных трубчатых УНМ. Их особенностью является значительная длина (в цитированной литературе приведены примеры формирования трубок длиной до 30 мкм) при малых размерах поперечного сечения, которое может быть в диаметре менее 1 нм. Такой волокнообразный материал, характеризующийся значительной прочностью на растяжение, может оказать огромное влияние на прочностные характеристики цементного камня и бетона.

Присутствие таких тончайших волокон в твердеющем цементном камне создает условия для эффекта «наноармирования» структуры новообразований в виде спонтанно формирующейся системы гидрокристаллов клинкерных минералов (n₁CaO · m₁SiO₂ · p₁H₂O; n₂CaO · m₂Al₂O₃ · p₂H₂O; n₃CaO · m₃Fe₂O₃ · p₃H₂O и др.). Малые поперечные размеры нановолокон при длине, значительно превышающей размеры собственно гидрокристаллов силикатов, алюминатов и ферритов кальция, соответствующих

~ 8,0 – 25,0 нм, обеспечивают необходимые предпосылки для «защемления» волокон в межплоскостных пространствах соседствующих поверхностей множества гидрокристаллов, что и обеспечивает эффект армирования нано- и микроструктуры объема новообразований затвердевшего цементного камня. Следствием этого является рост его прочности на растяжение и сжатие, что найдет отражение в готовящихся к публикации результатов экспериментов авторов.

Можно предположить, что использование волокнообразных УНМ позволит решить проблему повышения ударной вязкости (хрупкости) и деформативности высокопрочных бетонов, увеличить прочность на растяжение (осевое и при изгибе) традиционных конструкционных бетонов и обеспечить одновременно рост их способности сопротивляться сжимающим нагрузкам, а также возникающим при сложноподвиженном состоянии. Кроме этого означенный эффект может обеспечить существенное повышение прочности поризованных конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных бетонов, благодаря чему возможен рост их теплоизолирующей функции, что является одной из сложнейших в решении проблем строительного материаловедения. Основанием для такого утверждения является общепризнанный постулат теории разрушения хрупких материалов (включая бетон) от усилий, превышающих предел их прочности на растяжение и возникающих в поперечной плоскости к направлению приложения сжимающей нагрузки. Аналогией означенного эффекта на макроуровне является прием армирования бетона металлической фиброй, а также щелочестойким стекловолокном и другими волокнистыми материалами.

Далее в материале статьи частично представлены некоторые результаты исследований по оценке эффективности применения УНМ в цементных бетонах и выводы об основных направлениях и перспективах их развития.

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фазово-структурные изменения. Введение в цемент потенциально активного вещества УНМ может вызвать изменения как в развитии реакций его взаимодействия с водой, так и в образую-

щихся при этом продуктах гидратации. С целью проверки данного предположения были выполнены комплексные исследования проб затвердевшего цементного камня методом термического разложения (детермического анализа) и методом рентгенографического (рентгенофазового) анализа.

Данные дериватографического анализа. Исследования цементного камня, не содержащего (контрольный) и с УНМ в дозировке 0 – 0,1 %, осуществили с помощью лабораторного прибора-дериватографа (Q-1500Д), путем прокаливания проб в диапазоне температур «0-1000°C».

Метод дериватографии был использован для оценки возможного влияния добавки УНМ на развитие реакций гидратации цемента. Полученные дериватограммы (рис. 3 и 4) температурного разложения проб (приведены частично) цементного камня без и с наличием вещества УНМ (0,05 % от МЦ) свидетельствуют об их подобии вплоть до температуры, примерно в 600 °С. За пределами этой температуры есть отличия в графиках «ДТА» и «ДТГ», свидетельствующие об изменении реакций разложения в этой температурной области в пробах цементного камня с УНМ. Можно предположить, что это явление связано с влиянием вещества УНМ на морфологию новообразований, т.к. температурная «зона» разложения основной части гидрокристаллов (выделения химически связанной ими воды) приходится, примерно, на ≥ 600 °С (см. дериватограмму «чистого» цементного камня, рис. 3).

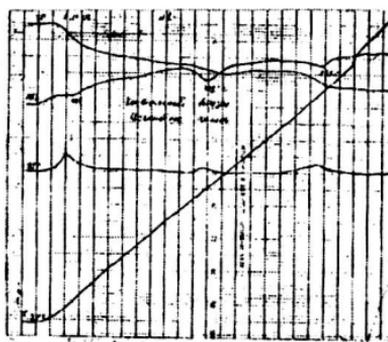


Рис. 3 Дериватограмма пробы «чистого» цементного камня (контрольная)

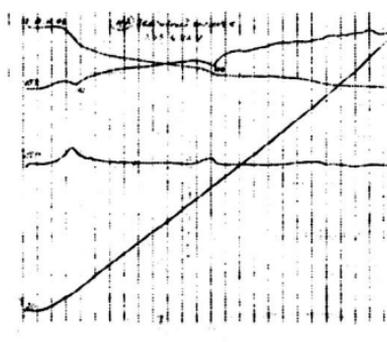


Рис. 4 Дериватограмма пробы цементного камня, содержащего 0,05% УНМ от массы цемента

В определенной мере это явление может быть также связано с химико-физическим влиянием вещества УНМ на процесс образования гидрокристаллов клинкерных минералов, а именно: их образуется больше, в сравнении с «чистым» цементным камнем. Однако этого объяснения недостаточно с учетом изменений графика «ДТА» в диапазоне температур > 600 °С, т.к. именно при этой температуре разлагаются гидрокристаллы силикатов кальция и выделяется химически связанная ими вода, а это отражает изменения в химической природе разлагающегося вещества. Не исключено также, что рассматриваемые изменения дериватограмм связаны с разложением собственно вещества УНМ, т.к. температурное разложение разновидностей графита соответствует диапазону значений $t \sim 670-830$ °С (для сажи), $t \geq 900$ °С (для чистого графита) [36].

С учетом этого обстоятельства необходимы дальнейшие исследования, в частности, в виде рентгенографического (рентгеноструктурного) анализа идентичных проб, результаты которого представлены в следующем разделе.

Данные рентгенографического анализа. Рентгенографический анализ фазового состава цементного теста образцов был проведен на пробах с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 при $\text{Cu}\alpha$ -излучении, напряжении на трубке 30 кV, токе 15мА.

Результаты рентгенографического анализа проб показывают, что введение УНМ в цемент сопровождается некоторыми изменениями в морфологии и количестве образующихся продуктов гидратации цемента, при этом максимум соответствует дозировке добавки $\sim 0,05$ % от массы цемента. Например, косвенной оценкой увеличения степени гидратации цемента может служить установленный рост количества гидроксида кальция с увеличением дозировки УНМ. Одновременно было выявлено и противоречие, заключающееся в том, что количество клинкерного алита (одного из наиболее активных и играющих важную роль в наборе прочности бетоном) в пробах с добавкой возросло, в сравнении с контрольной.

Оценка этой ситуации по совокупности данных дериватографического и рентгенографического методов исследований,

накопленных к данному моменту, однозначно свидетельствует о наличии изменений в структурно-морфологическом строении кристаллогидратных новообразований цементного камня под влиянием введенного в цемент вещества УНМ. Для целенаправленной модификации в дальнейшем физико-технических свойств цементного камня и бетона в целом необходимы углубленные исследования по данному направлению, тем более, что физическое отражение установленных изменений морфологии проявляется, как это будет показано далее, в росте прочности цементного камня.

Прочность цементного камня. На рис. 5 и 6 приведены (частично) фактические данные по оценке прочности на сжатие и тенденции ее изменений для образцов цементного камня в зависимости от времени твердения (рис. 5) и количества (дозировки) вещества УНМ в процентах от массы цемента (рис. 6). Образцы цементного камня (размеры 20x20x20 мм) изготовлены из цементного теста «нормальной густоты» (стандартизированный показатель цемента) и твердение до испытаний в стандартных нормально-влажностных условиях ($t \sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$; относительная влажность $\phi \geq 90\%$).

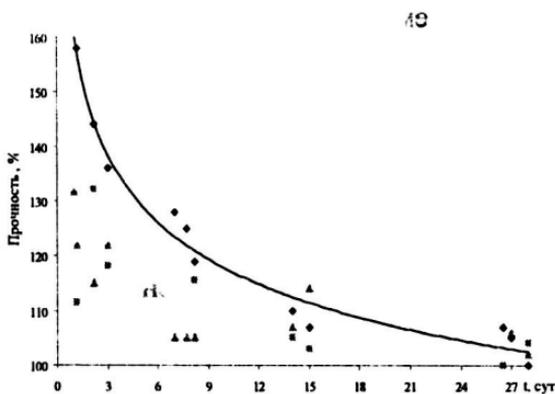


Рис. 5 Тенденция изменений прочности цементного камня с УНМ (нормально-влажностное твердение; дозировка 0,05% от МЦ)

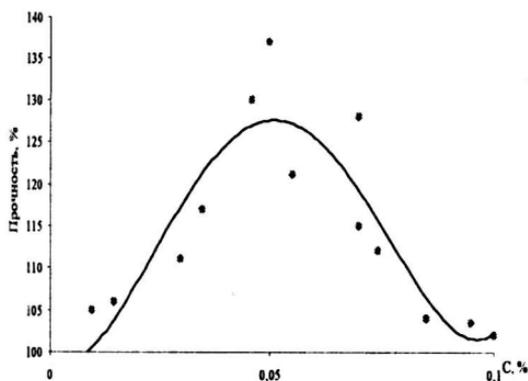


Рис. 6. Прочность цементного камня с УНМ в зависимости от величины дозировки

Эксперименты с целью поиска разновидностей УНМ, характеризующихся наибольшей эффективностью, выраженной ростом прочности цементного камня и бетона продолжают. В частности, исследуется вариант их воздействия на высокопрочные бетоны ($f_c > 100$ МПа). Но уже на основании полученных данных можно обоснованно говорить о наличии общей положительной тенденции влияния ряда веществ УНМ на рост прочности цементного камня в стандартном проектном возрасте (28 сут) и более существенного влияния их на кинетику ее роста в начальный период, что позволяет одновременно рассчитывать на эффект снижения энергетических затрат при ускорении твердения бетона сборных и монолитных строительных конструкций с соответствующим сокращением времени оборота форм и опалубок и связанной с этим экономической эффективностью.

Весьма важным является достижение означенного эффекта при малых дозировках вещества УНМ, оптимальная величина которой (см. рис. 6) примерно соответствует $\sim 0,05$ % от массы цемента, что коррелирует с данными рентгенографического анализа. Следует учесть, что содержание собственно вещества углеродного наноматериала составляет, примерно, 10 – 30 % от общей массы введенной в цемент добавки, т.е. 0,005 – 0,015 % от массы цемента. Это подтверждает основное положение нашей рабочей гипотезы о чрезвычайной значимости энергетической активности поверхности ультрадисперсных УНМ в реагирующей системе «цемент-вода».

Коррозионное состояние стальной арматуры. Основная задача данных исследований заключалась в выявлении возможного влияния вещества углеродной нанодобавки на сохранность стальной арматуры в бетоне при введении ее в цемент (бетон), а целью исследований являлось определение области применения бетона, модифицированного углеродной нанодобавкой, для железобетонных конструкций, включая преднапряженные.

Для достижения поставленной цели выполнили исследования возможного коррозионного воздействия добавки УНМ на арматуру в бетоне по методике СТБ 1168-99 [52] как для «направления 1» при разовом насыщении бетона водой с последующим «снятием» поляризационных кривых, так и при циклическом насыщении-высушивании (при насыщении в 5 % растворе NaCl).

Оценка защитной способности бетона с нанодобавкой по отношению к стальной арматуре как при одноциклических электрохимических испытаниях, так и в динамике ее возможного изменения при внешней агрессивной среде (раствор NaCl) показывает, что бетон с нанодобавкой до 0,15 % от массы цемента обеспечивает сохранность стальной арматуры без признаков ее активизации (плотность тока менее 5 мА при $E = 300$ мВ) и может применяться в железобетонных строительных конструкциях без ограничений, включая преднапряжение стальной арматуры, использование проволоки, а также сортамента арматуры на ее основе.

Стандартизированные свойства. В рамках выполнения комплекса исследований осуществлена проверка стандартизированных свойств цемента и бетонных смесей на вяжущем, модифицированном веществом УНМ.

Установлено, что исследованные вещества УНМ, произведенные в Институте тепло- и массообмена для обеспечения работ из разных исходных материалов и по различающимся технологиям, не оказывают негативного влияния на водопотребность (нормальную густоту), сроки схватывания и равномерность изменения объема цемента, а также на технологические характеристики бетонных смесей: сохраняемость удобоукладываемости (формуемости), водоотделение и расслоение, что в целом свидетельствует о допустимости их применения в цементных бетонах.

Установлен рост активности цемента, определенный по стандартизированной методике, что согласуется с приведенными в материале статьи данными о росте прочности цементного камня, модифицированного УНМ, и составляет основу для повышения прочностных характеристик цементных бетонов.

Направления развития исследований. Результаты начальной фазы поисковых исследований, целью которых являлась проверка возможности и оценка вероятной эффективности применения полученных в Институте тепло- и массообмена отечественных углеродных наноматериалов в цементных бетонах, дали в целом оптимистический ответ на этот вопрос в виде установленной положительной динамики роста активности цемента, прочности цементного камня и отсутствия отрицательных воздействий на важнейшие технологические свойства бетонных смесей и эксплуатационные свойства бетона и железобетона.

В процессе выполнения экспериментов был апробирован широкий спектр веществ УНМ, различающихся видом исходного сырья и особенностями технологии получения, с целью снижения стоимости конечного продукта и повышения его качественных характеристик.

Отработаны технологические приемы введения малых количеств УНМ в твердофазный порошкообразный материал – цемент и в бетонные (растворные) смеси, выполнены начальные исследования структурно-морфологических изменений в продуктах гидратации клинкерных минералов цемента и особенностей формирования их структуры под влиянием вещества УНМ. Выявлены разновидности вещества УНМ и условия, соответствующие проявлению ими благоприятного воздействия на процессы взаимодействия цемента с водой и кинетику роста прочности цементного камня и бетона.

Общая ориентация выполненных и продолжающихся исследований на бетоны плотной и поризованной структуры рациональна и оправдана как достигнутой общей положительной тенденцией в результатах исследований, так и значимостью этих материалов для строительной отрасли Беларуси и с учетом их роли в мировом строительном производстве.

С учетом изложенного можно сформулировать следующие направления исследований, преследующие цель создания и развития нанотехнологий применительно к строительному материаловедению и, в частности, в технологии бетонов:

- производство веществ углеродных наноматериалов с заданными структурными и физическими характеристиками;
- производство веществ УНМ с устойчиво прогнозируемыми структурными и физическими характеристиками при минимальной стоимости конечного продукта;
- производство кремнеземосодержащих наноматериалов, а также высокопрочных волокнообразных УНМ;
- исследования морфологических и структурных изменений в продуктах гидратации цемента, модифицированного УНМ, для целенаправленного воздействия на формирование структуры и свойств цементного камня и бетона;
- разработка технологии и создание бетонов плотной и пористой структуры с повышенными прочностными и эксплуатационными свойствами;
- создание строительных материалов со специальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами;
- развитие научных основ технологий, способов и приемов получения и применения ультрадисперсных наноматериалов при производстве бетонов и иных разрабатываемых строительных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 2006-2009 гг. в БНТУ развернуты комплексные поисковые исследования по оценке возможности и эффективности применения в цементном бетоне углеродных наноматериалов, полученных в Институте тепло- и массообмена имени А.Лыкова НАН Беларуси. Их важнейший результат заключается в выявлении общей тенденции благоприятного воздействия минимальных дозировок вещества УНМ (0,005-0,05 % от массы цемента) на физико-технические свойства цементного камня и бетона, проявляющиеся в росте их прочности и плотности, поскольку эти свойства являются базовыми для обеспечения несущей способности, эксплуатационной надежности и долговечности строительных (бетонных и железобетонных) конструкций.

Необходимо отметить, что круг возможных направлений использования УНМ и требующих решения задач постоянно расширяется. Планируемые исследования будут сосредоточены на наиболее важных из них, в том числе на тех, которые в ближайшей перспективе могут быть реализованы в строительном производстве.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kroto, H.W. [at al.] // Nature. – 1985. - Vol. 318. - P. 162.
2. Kraetschmer, W. [at al.] // Nature. – 1990.- Vol. 347. - P. 354.
3. Iijima, S. // Nature. – 1991. – Vol. 354. - P. 56.
4. Ebbesen, T. W. and Ajayan, P. M. // Nature. – 1992. - Vol. 358. - P. 220-222.
5. Mintimire, J.W. Dunlap, B.I., White, C.T. // Phys. Rev. Lett. – 1992. - Vol. 68. - P. 631.
6. Елецкий, А.В., Смирнов, Б.М.// УФН. – 1993. - Т.163.- № 2. - С. 1.
7. Hamada, N., Sawada, S., Oshijama, A. //Phys. Rev. Lett. – 1992.- Vol. 68.- P. 1579.
8. Iijima, S., Ichihashi, T. // Nature. – 1993. - Vol. 363. - P. 603.
9. Dresselhaus, M.S. // Nature. – 1992. - Vol. 358. - P. 195.
10. Pederson, M.R. Broughton, J.Q. // Phys. Rev. Lett. – 1992. - Vol. 69.- P. 2689.
11. Jose-Yacamán, M. // Appl. Phys. Lett. – 1993. - Vol. 62.- P. 657.
12. Tsang, S.C., Harris, P.J.F., Green, M.L.H. // Nature.- 1993.- Vol. 362.- P. 520.
13. Tanaka, K. // Chem. Phys.Lett. – 1992. - Vol. 191. - P. 469.
14. Rodriguez, N.M., Kim, M.S., Baker, R.T.K. // J. Catal. - 1993.-Vol. 144.- P. 93.
15. Subramoney,S. // Nature. – 1993. - Vol. 366. - P. 637.
16. Yudasaka, M., Kikuchi, R., Matsui, T., Ohki, Y., Yoshimura, S., Ota, E. // Applied Physics Letters. – 1995. - Vol. 67. - P.17.
17. Nikolaev, P., Bronikowski, M., Bradley, J., Kelley R., Rohmund, F., Colbert, D., Smith, K., Smalley, R. // Chemical Physics Letters. – 1999. - Vol. 313. - P. 1-2.
18. Scott, C., Arepalli, S., Nikolaev, P., Smalley, R. // Applied Physics A: Materials Science & Processing. - 2001. - Vol. 72. - P. 5.
19. Zhdanok, S.A. // Fifth ISTC Scientific Advisory Committee Seminar «Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology», St. Petersburg, 27-29 May, 2002.- Spb.-2002.
20. Ajayan, P.M., Iijima S. // Nature.- 1993. - Vol. 361. - P. 333.
21. Ebbesen, T.W. // Nature. - 1994. - Vol. 367. - P 519.
22. Tsang, S.C., Harris, P.J.F., Green, M.L.H. // Nature. - 1993. - Vol. 362. - P. 520.

23. Tsang, S.C. // Nature. – 1994. - Vol. 372. - P. 159.
24. Seraphin, Setal // Appl. Phys. Lett. - 1993. - Vol. 63. - P. 2073.
25. Jose-Yacamán, M. // Appl. Phys. Lett. – 1993. - Vol. 62. - P. 657.
26. Chang, X Betal // Europhys. Lett. – 1994. - Vol. 27 (2). - P. 141.
27. Howard, J B, Chowdhury, K D, Vander Sande, J B. // Nature. - 1994. - Vol. 370. - P. 603.
28. Ivanov, V. // Chem Phys. Lett. - 1994. - Vol. 223. - P. 329.
29. Guo, Tetal. // Chem. Phys. Lett. – 199?. - Vol. 243. - P. 49.
30. Hsu, W.K. // Nature. – 1995. - Vol. 77. - P. 687.
31. Hsu, W K. // Chem. Phys. Lett. – 1996 - Vol. 262. - P. 161.
32. Colbert, D.T. // Science. – 1994. - Vol. 266. - P. 1218.
33. Dravid, V.P. // Science. – 1993. - Vol. 259. - P. 1601.
34. Imamura, M., Jpn, J. // Appl. Phys. - 1994. - Vol. 33(2). - P.1016.
35. Saito, Y. // Phys. Rev. Lett. - 1994. - Vol. 72. - P. 1722.
36. Елецкий, А.В. // УФН. – 1997. - Т. 167. - № 9.
37. Патент №2839 Республика Беларусь. Установка для получения углеродных наноматериалов/ С.А.Жданок, А.В.Крауклис, П.П.Самцов, В.М.Волжанкин.
38. Патент №3125 Республика Беларусь. Плазмохимический реактор конверсии углеводородов в электрическом разряде/ Жданок С.А. и др.
39. Ваучский, М.Н. Направленное формирование упорядоченной надмолекулярной структуры гидратированных минеральных вяжущих. / М.Н Ваучский // Вестник гражданских инженеров. – 2004. - №2(3). - С. 44 – 47.
40. Яковлев, Г.И. Нанодисперсная арматура в цементном пенобетоне / Г.И. Яковлев //Технологии бетонов. -2006.- № 3. - С. 68-71.
41. 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 междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов», Москва, 13-16 ноября, 2006 г.: тез. докл. - М., 2006. - С. 514-516.
42. Пухаренко, Ю.В. Наноструктурирование воды затворения

- как способ повышения эффективности пластификаторов бетонных смесей / Ю.В. Пухаренко, В.А. Никитин, Д.Г. Летенко // Строительные материалы. – 2006. – № 8. [Приложение к научно-техническому журналу «Строительные материалы». – 2006. – № 9]. – С. 11-13.
43. Королев, Е.В. Модифицирование строительных материалов наноглеродными трубками и фуллёренами / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, В.А. Береговой // Строительные материалы. – 2006. – № 8. [Приложение к научно-техническому журналу «Строительные материалы». – 2006. – №9]. – С. 2-4.
44. Лотов, В.А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий. // Строительные материалы. – 2006. – №8. – С. 10-12.
45. Комохов, П.Г. Наноструктурированный радиационный бетон и его универсальность. / П.Г. Комохов, Н.И. Александров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 5. – С. 38-40.
46. Чернышов, Е.М. Модифицирование структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема (вопросы теории и приложений) / Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 5. – С. 30-32.
47. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон. / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
48. Вавржин, Ф. Химические добавки в строительстве. / Ф. Вавржин, Р. Крмча. – М.: Стройиздат, 1964. – 288 с.
49. Ma, J. // Ultra High Performance Self Compacting Concrete / J. Ma, J. Dietz // LACER. -2002. - № 7.
50. Уникальные бетоны и технологии в практике современного строительства России / С.С. Каприелов [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр. – Минск: Стринко, 2007. – С. 105-120.
51. Tsang, S.C. // Fullerenes and Fullerene Nanostructures. - Singapore: World Scientific, 1996. - P. 250.
52. СТБ 1168-99. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 1999.