

Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии

К.т.н., член ЦП НОР, генеральный директор А.Н. Пономарев,
ООО «НТЦ Прикладных Нанотехнологий»*

Цементные бетоны представляют собой величайшее открытие, позволившее резко изменить и эффективно развивать техносферу обитания человечества. Бетоны можно классифицировать, как многокомпонентные композиционные материалы на основе минеральных вяжущих, свойства которых определяются видом, размерностью и характером взаимодействия компонентов. При этом одним из самых существенных факторов, определяющих их свойства, является учет особенностей взаимодействия этих компонентов и их соединений на межфазных границах в уже затвердевших бетонах. В целом, без особых ошибок можно утверждать, что технология любого бетона, в силу высокой дисперсности компонентов, особенно цемента, – классический пример издавна существовавшей промышленной нанотехнологии. Однако, несмотря на поговорку, что новое – это хорошо забытое старое, следует обратить внимание на то, что именно интерес к нанотехнологиям побудил объединить и сфокусировать взгляды физиков, химиков и широкого круга материаловедов на комплексе старых и новых инструментов, которые могут и уже смогли направленно влиять на характеристики применяемых в строительной практике цементных бетонов.

Доля и роль высококачественных бетонов (High performance concretes) в мировой строительной индустрии стремительно возрастает и сопровождается стремительное развитие архитектурных форм и функционально новых видов сооружений. И, как всегда в диалектике развития, в строительной отрасли, споря, сосуществуют две идеи: с одной стороны – стремление максимально удешевить серийное производство однотипных сооружений, в том числе за счет оптимизации издержек при производстве строительных материалов, с другой стороны – желание системно разрешить и технические, и экономические задачи при проектировании и возведении уникальных сооружений или сооружений новых видов. Во втором случае повышенная стоимость новых материалов с высокими и, возможно, уникальными комплексами параметров, никого не смущает, если эти материалы открывают возможности для эффективных проектных решений.

Изложенные соображения полностью применимы и относятся к новому направлению, формирующемуся в последнее десятилетие – к нанотехнологии в строительном материаловедении. За последние три-пять лет количество публикаций по данному направлению в научной литературе возросло и возрастает многократно. Однако следует отметить, что до настоящего времени среди этих публикаций доминируют описания локальных исследований, касающихся интересных, но частных технических решений. Одна из первых попыток обобщить опубликованные результаты экспериментальных работ была сделана Константином Соболевым на основе опыта Американского Института Цемента [1]. Однако на тот момент изученного материала для полноценного анализа было явно недостаточно.

В настоящей работе предпринимается следующая попытка в этом направлении, основанная, в том числе, на опыте НТЦ Прикладных Нанотехнологий, начавшего экспериментально-исследовательские работы в указанной области в 1998 году и получившего первый в мире патент на изобретение [2], связанное с опытами по введению в состав бетона синтетических углеродных наноматериалов фуллероидного типа.

Основные идеи и направления технологии нанобетонов

Термин «нанобетон» хорош только тем, что краток. И, при этом, требует обязательных пояснений. Во-первых, это вовсе не конкретный бетон, а только лишь обозначение бетона, который каким-то образом связан с какими-то наноматериалами, или нанотехнологиями. Возможно, лучше было бы его не применять, но слово уже прижилось. И в этом случае лучший выход – постараться систематизировать известные физические идеи, которые направлены на применение в бетонах каких-либо наноматериалов и каких-либо нанотехнологий. Попытаемся сделать это на примере таблицы 1.

Из приведенной таблицы следует, что возможных «нано» инструментов для создания высококачественных бетонов найдено уже довольно много, подходы эти весьма разнообразны, и они позволяют реализовать инновационные конструкторско-технологические решения, полезные для самых различных областей строительства. Кратко рассмотрим некоторые из недавно найденных, на взгляд авторов, наиболее интересных методов строительной нанотехнологии и, на примере практических результатов создания и применения легкого конструкционного нанобетона, оценим синергизм их совместного действия.

Таблица 1

№ п/п	Материалы	Технологии	Конструкции
1.	Цемент (наночастицы цемента)	Повышение дисперсности и активности методами механоактивации [1]	Высокопрочные конструкционные элементы зданий и сооружений
2.	Цемент (наночастицы цемента)	Повышение активности методами механоактивации непосредственно перед использованием [1]	Пеноблоки в производстве пенобетона
3.	Заполнитель (речной песок, габродиабазовая мука, амфиболитовая мука и т.п. – наночастицы заполнителя)	Расширение спектра дисперсности заполнителя с включением регулируемого количества нанодисперсной фазы [1]	Высокопрочные конструкционные элементы зданий и сооружений
4.	Активный высокодисперсный заполнитель – (наночастицы аморфного микрокремнезема, пуццолановых добавок и т.д. .)	Улучшение структуры цементного камня и его взаимодействия с наполнителем [2]	Высокопрочные конструкционные элементы зданий и сооружений
5.	Наноразмерные зародыши направленной кристаллизации цементного камня (фуллероиды, нанотрубки, аддукты фуллероидов, аддукты нанотрубок и т.п.)	Улучшение структуры цементного камня, его дисперсное самоармирование [3,4]	Высокопрочные конструкционные элементы зданий и сооружений с повышенной трещиностойкостью
6.	Наномодифицированные заполнители–песок и др. (модификаторы – фуллероиды, их аддукты, аддукты нанотрубок, твердые наночастицы гидросиликатов и т.п.)	Улучшение (уплотнение) межфазных границ [5]	Высокопрочные конструкционные элементы зданий и сооружений
7.	Наномодифицированные дисперсно-упрочняющие заполнители (модифицированные фуллероидами, нанотрубками и т.п. базальтовая микрофибра, углеродные микроволокна и т.д.)	Динамическое дисперсное армирование бетона [6]	Высокопрочные конструкционные элементы зданий и сооружений с повышенной трещиностойкостью
8.	Наномодифицированные пластификаторы (наночастицы микрокремнезема, фуллероиды, их растворимые аддукты)	Технология литых и самоуплотняющиеся бетонов [7]	Бетонные конструкции сложной формы и высотные конструкции
9.	Наномодифицированные полимерные добавки (модификаторы – наночастицы оксидов, фуллероиды, нанотрубки, их аддукты)	Повышение водонепроницаемости и коррозионной устойчивости с одновременным увеличением эксплуатационного ресурса полимербетонов [8]	Бетонные и ж/б конструкции, работающие в условиях агрессивных сред (тоннели коллекторов, морские сооружения, наливные полы, узлы химических агрегатов и т.д.)
10.	Нанокompозитная некоррогирующая арматура (наномодифицированные фуллероидами легкие полимербетоны в оболочках из модифицированных фуллероидами нанокompозитов на основе высокомодульных волокон)	Технология получения коррозионно-устойчивых, неактивируемых облегченных бетонных конструкций с высокими показателями прочности на изгиб и повышенной трещиностойкостью [9]	Бетонные узлы ядерных энергетических установок, детали конструкций, работающие в условиях агрессивных сред, детали морских и высотных пожароустойчивых сооружений и т.д.
11.	Фотокатализаторы синтеза синглетно-возбужденного кислорода (фуллероиды, порфирины)	Технология фотодинамической самостерилизации поверхности бетонных конструкций – противодействие биологической коррозии [10]	Бетонные детали тропического исполнения, узлы надводных морских сооружений, трубы и емкости для биологически активных сред

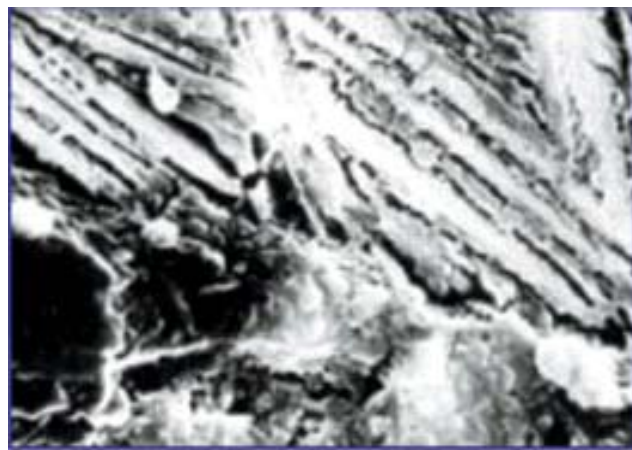
Микроармирование и динамическое дисперсное самоармирование цементного камня

Дисперсное взаимодействие коллоидных частиц в цементных растворах и в бетонных смесях определяет, в том числе, плотность структуры и последующие характеристики бетонов после окончания процессов гидратации цементных вяжущих. В свою очередь, силы дисперсионного взаимодействия имеют электростатическую природу, при этом напряженность электрических полей при таком взаимодействии в среднем составляет 10^6 В/м. Однако значения этих сил могут значительно отличаться и в большую сторону – при определенных условиях и при наличии в коллоидных системах частиц особой топологической формы, имеющих при этом необходимые значения действительной части диэлектрической проницаемости [11].

Следовательно, возможны (и наблюдаются экспериментально) гигантские резонансные усиления поля вблизи поверхности таких частиц. Это, в свою очередь, не может не приводить к пространственным изменениям в процессах образования соответствующих кристаллогидратов (собственно цементного камня). Такими частицами могут являться, например, короткие углеродные нанотрубки определенной формы и крупные многослойные полиэдральные наночастицы фуллероидного типа – астралены [12]. Введение таких частиц в бетонные смеси в самом незначительном количестве (менее, чем $10^{-3}\%$) приводит к росту в составе цементного камня протяженных структур длиной в сотни мкм. Наличие таких образований является ничем иным, как микродисперсным самоармированием цементного камня, что приводит к соответствующему упрочнению бетонов на основе таких нанодобавок [3,4]. На Рис 1 приведена структура «обычного» цементного камня, полученная в стандартных условиях твердения и «фибриллярная» структура дисперсно самоармированного цементного камня, полученного затворением обычной водой с добавками астраленов в виде низкоконцентрированной суспензии



а



б

Рисунок 1. Фотография структуры обычного (а) и микродисперсноармированного цементного камня (б). Увеличение X 5000

Однако вводить какие-либо серьезные технологические изменения в широкую строительную практику – задача крайне трудоемкая и затратная. В этом смысле появление в бетонных смесях такой нежной субстанции как тонкие суспензионные добавки – направление неперспективное, поскольку суспензии сильно чувствительны и к изменениям уровня активности водородных ионов в воде, и к температуре среды. Колебания этих параметров могут приводить к агрегации «взвешенных» наночастиц и к выпаданию уже бесполезных осадков. Поэтому гораздо более интересным направлением использования структурирующих наноинициаторов бетонных смесей является предварительное их нанесение на твердые носители и использование сухих комбинированных добавок.

Параллельно решается задача «последовательного разбавления», необходимого для равномерного распределения крайне малого количества необходимых наноинициаторов по объему бетонной смеси. В этом случае необходимое распределение достигается привычным механическим перемешиванием. Теперь главным становится правильный выбор носителя. Это может быть и обычный речной песок, в этом случае распределение фибриллярной структуры цементного камня по направлениям носит практически изотропный характер, и микроармирование наблюдается на протяженности всего лишь сотен микрон. Но если в качестве носителя выбирать высокомодульные микроволокна (строительные микрофибры), то неожиданно возникают совершенно новые возможности.

Т.е., с одной стороны, микрофибра сохраняет свои достоинства как удобный для технологии перемешивания материал, а с другой стороны, каждое отдельное волокно в процессе созревания бетона «разрастается» в преимущественном направлении расположения этого конкретного волокна, усиливая эффекты дисперсного армирования. Такой метод можно определить как динамическое дисперсное самоармирование бетона. В качестве микрофибры – носителя наноинициаторов авторы использовали высокомодульные базальтовые микроволокна длиной 100-500 мкм, создав впоследствии серийное производство модифицированной базальтовой микрофибры МБМ ТУ 5761-014-13800624-2004 и порошковые углеродные микроволокна с еще более высокими показателями по прочности на растяжение. На рис. 2 представлены микрофотографии, иллюстрирующие динамику развития дисперсного самоармирования бетона по описанной выше технологии.



24 часа



28 суток



6 месяцев

Рисунок 2 Микрофотографии излома образцов бетона на различных сроках созревания с различной степенью развития дисперсного самоармирования. Увеличение X 200

Управление подвижностью бетонных смесей

Эффект влияния наночастиц фуллероидного типа на подвижность бетонных смесей был обнаружен в 2000 г., и сразу же было начато его подробное изучение [4, 7]. Первые же опыты с суспензиями разнообразных фуллероидов показали, что введение этих суспензий в состав бетонных смесей позволяет резко упростить переход по удобоукладываемости этих смесей с П1 до П5 при меньшем количестве применяемых пластификаторов, естественно, при одном и том же водоцементном соотношении. Однако, к сожалению, отмеченные выше недостатки суспензионных технологий создают основу для низкой воспроизводимости получаемых результатов. Но даже эти первые результаты позволили отметить крайне интересный факт: наблюдаемые эффекты модификации подвижности бетонных смесей совершенно не зависят от типа и вида собственно пластификатора. Это могут быть и лигносульфонатные и сульфонафталиновые и современные олигокарбоксилатные материалы и любые их сочетания. То есть наблюдаемые эффекты носят чисто физическую природу и не связаны с какими-либо химическими реакциями на поверхности раздела фаз.

Одна из предложенных физических моделей наблюдаемого эффекта сводится к представлению о том, что на поверхности наполнителя существуют области искривления поверхностного потенциала, вызванного наличием сгруппированных дефектов структуры и выходом дислокаций. Эти искривления эквипотенциальных поверхностей вызывают увеличение значений величины работы, необходимой для перемещения масс гетерогенных смесей вдоль поверхности этого наполнителя, что и приводит к уменьшению подвижности этих смесей. Введение же низкоразмерных частиц, способных к тому же к сильному дисперсионному взаимодействию, приводит к последующему осаждению таких наночастиц в эти «особые» области, к «залечиванию» дефектов поверхности и к снижению величины работы по перемещению смесей вдоль поверхности наполнителя.

Такая модель позволяет объяснить независимость эффектов модификации пластификаторов от их химической природы. Остается проблема обеспечения стабильности наблюдаемого полезного эффекта. Одним из путей ее решения является синтез аддуктов (производных) нанокластеров углерода, растворимых в воде благодаря присутствию в них специальных функциональных групп. Такая задача была решена за счет введения в состав углеродных нанокластеров гидроксильных и сульфокислотных групп. Это дает возможность перехода к массовому промышленному производству достаточно дешевых растворимых аддуктов нанокластеров углерода (АНКУ). АНКУ обеспечивают стабильное во времени и в широком диапазоне внешних условий повышение эффективности действия большинства промышленных пластификаторов бетонных смесей, что иллюстрируется данными таблицы 2.

Таблица 2. Результаты модификации пластификаторов различных типов

Тип пластификатора	Расход модификатора относительно цемента, %	Расход пластификатора для перехода от П1 до П5, %
СП-1 (С-3)	-	0,6-0,9
СП-1 (С-3)	0,003	0,1-0,15
Актипласт	-	2,3
Актипласт	0,003	1,2
Zica VisConcrete-125	-	0,4
Zica VisConcrete-125	0,002	0,2

Модифицированные пластификаторы – это, в первую очередь, инструмент для создания новых марок высококачественных бетонов с максимально высокими служебными параметрами, но этот же инструмент может быть использован и для решения задач банального снижения себестоимости при производстве марок обычного товарного бетона. Например, для производства товарного бетона марки В45 обычно требуется не менее 550 кг портландцемента ПЦ500Д0, но с использованием модифицированного СП-1 специалистами НТЦ Прикладных нанотехнологий в содружестве с Испытательным Центром МО-72 была разработана и испытана рецептура бетона с такими характеристиками:

Плотность, т/м ³	2,45
Прочность на сжатие, МПа.....	65
Морозостойкость, не менее.....	F350
Водонепроницаемость, не менее.....	W18
Удобоукладываемость, не менее.....	П4
Расход цемента на 1 м ³ , кг, не более.....	400

Легкий наноструктурированный бетон для мостостроения, высотного и специального строительства и опыт его применения

К бетонам, как к основному строительному материалу, в различных проектах предъявляются достаточно разнообразные требования. Но практически всегда проектировщик заинтересован в доступе к конструкционным бетонам с минимальным удельным весом при сохранении или даже развитии несущих способностей деталей, выполненных из такого бетона. Существующие стандарты легких конструкционных бетонов позиционируют их в диапазоне плотностей от 1,2 до 1,7 т/м³. Известен целый ряд таких материалов (керамзитобетоны, шунгезитобетоны, вспененные бетоны и т.д.), однако основными их недостатками являются относительно невысокая прочность и низкая морозостойкость, как следствие высокой пористости. В то же время в легких и прочных бетонах и, одновременно, в бетонах с высокой климатустойчивостью (морозостойкостью) заинтересованы проектировщики автодорожных мостов, девелоперы, занятые реконструкцией центров старых городов при повышении этажности и изменении облика зданий, но без замены фундамента, проектировщики высотных зданий и сооружений и т.п. Поэтому при выборе направлений, на которых можно было бы наиболее эффективно реализовать синергизм применения новых методов и материалов, авторы остановились именно на задаче создания легкого конструкционного бетона с максимально высокими характеристиками.

Эта задача решалась на основе поиска оптимального сочетания в наборе стандартных (цемент ПЦ500Д0, речной песок, щебень) и нестандартных (активированный микрокремнезем, легкий наполнитель, модифицированная базальтовая микрофибра, модифицированные пластификаторы и т.д.) компонентов [14]. На основе этого решения был разработан и испытан бетон легкий наноструктурированный ТУ 5789-035-23380399-2008. Основные параметры нового легкого конструкционного бетона:

прочность на сжатие, МПа, не менее.....	45-55
прочность на растяжение при изгибе, МПа, не менее.....	6-8
водонепроницаемость, W, не менее.....	14-20
морозостойкость, циклов, не менее.....	350
удобоукладываемость.....	П4-П5
плотность, кг/м ³ , не более.....	1500-1600

Легкий нанобетон был испытан и рекомендован для применения в аккредитованном испытательном Центре «Дормост», в лабораториях МО-90, МО-19, МО-72 и др. В 2009 г. во Французском Институте Бетона и Железобетона начата работа по валидации и выдаче рекомендаций по его применению в странах Евросоюза (Отчет CSTB № EEM 09 26021260), работа по его сертификации для национального использования выполнена в Хорватии (Отчет Geoexpert IGM № B-04-05.09-02-01).

На рис. 5, на котором представлено изображение излома легкого нанобетона, можно наблюдать уплотненные границы наполнителей и цементного камня. При этом большая часть пор является закрытой и изолированной от внешних поверхностей. Такая структура бетона позволила при довольно высокой (8-16%) пористости обеспечить высокие значения водонепроницаемости

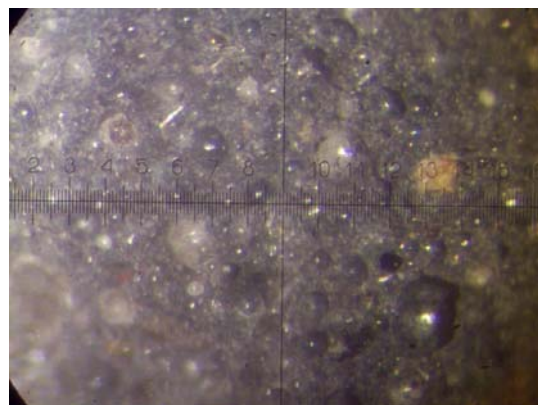


Рисунок 5. Изображение излома легкого нанобетона. Увеличение X 200

Значения плотности легкого бетона наноструктурированного могут, в принципе, изменяться в пределах от 850 до 1700 кг/м³, но значения в 1500-1600 кг/м³ были выбраны неслучайно.

Именно в период активной отработки композиции (2006-2007 гг) в ЗАО «Институт Стройпроект» проводилась работа по корректировке проектной документации по реконструкции моста через р. Волга в г. Кимры и строители столкнулись с острой необходимостью обеспечить выравнивание дорожной плиты (с неравномерностью проседания до 1,5 м) в условиях обязательного повышения судоходности за счет увеличения пролетной части. Принятое решение о применении легкого конструкционного бетона с отказом от выполнения утяжеляющей гидроизоляции было экспериментальным шагом, но практически единственным. Мост был построен и введен в эксплуатацию в конце 2007 г. (см. рис. 6).



Рисунок 6. Мост через реку Волга в г. Кимры



Рисунок 7. Фотография моста через реку Вятка с дорожной плитой из БЛН

Этот прецедент способствовал продолжению работ по совершенствованию технологии легкого нанобетона и расширению спектра его использования. Приготовление бетонных смесей на стандартных растворно-бетонных узлах, даже в условиях достаточно высокой технологической дисциплины, характерной для мостоотрядов, не позволяет вводить в смеси более одного-двух дополнительных компонентов. Таким образом, был поставлен вопрос о создании производства комплексных сухих добавок, позволяющих использовать многокомпонентную комплексную добавку в условиях уже стандартных бетонных заводов. Для решения этой задачи была спроектирована и изготовлена специализированная полуавтоматическая линия мощностью до 800 тонн добавок в месяц. Линия была введена в эксплуатацию в 2008 г. Это позволило перейти к планированию следующих объектов, одним из которых стал реконструируемый мост через реку Вятка, фотография которого приведена на рис. 7. Мост принят в эксплуатацию в 2008 г.

В настоящее время проходят государственную экспертизу два законченных проекта довольно крупных мостовых сооружений, в которых также предполагается использование легкого нанобетона.

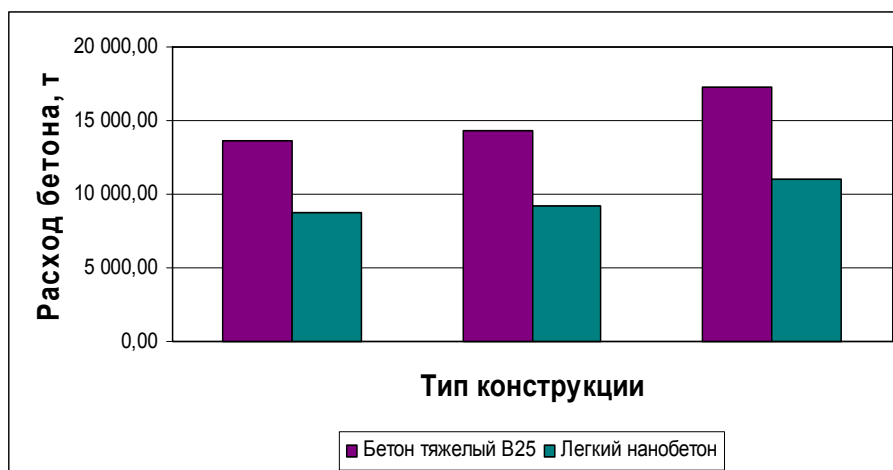


Рисунок 8. Диаграмма сравнительных объемов работ по укладке бетона

Однако дополнительные подготовительные операции и номенклатура компонентов легкого нанобетона, цена которых значительно превышает цену цемента и обычного песка, составляют основу для расчета стоимости легкого нанобетона, которая значительно превышает стоимость обычных марок товарного бетона. Исходя из этого, возникает необходимость тщательного функционально-ценового анализа целесообразности проектных решений, предусматривающих его использование. Такой анализ выполнили сотрудники кафедры «Технология, организация и экономика строительства» (ТОЭС) ГОУ СПбГПУ под руководством д.т.н., профессора Н.И. Ватина. Была проведена оценка уменьшения веса монолитных многоэтажных конструкций и следующего за этим уменьшения объемов укладки бетона. Результат расчета иллюстрируется на рис. 8, на котором приведены данные для конструкций колонного, пилонного и стенового типа. На рис. 9 приведена зависимость затрат на оплату стоимости производства работ в зависимости от этажности здания (Условно принятая площадь этажа -540 м²)

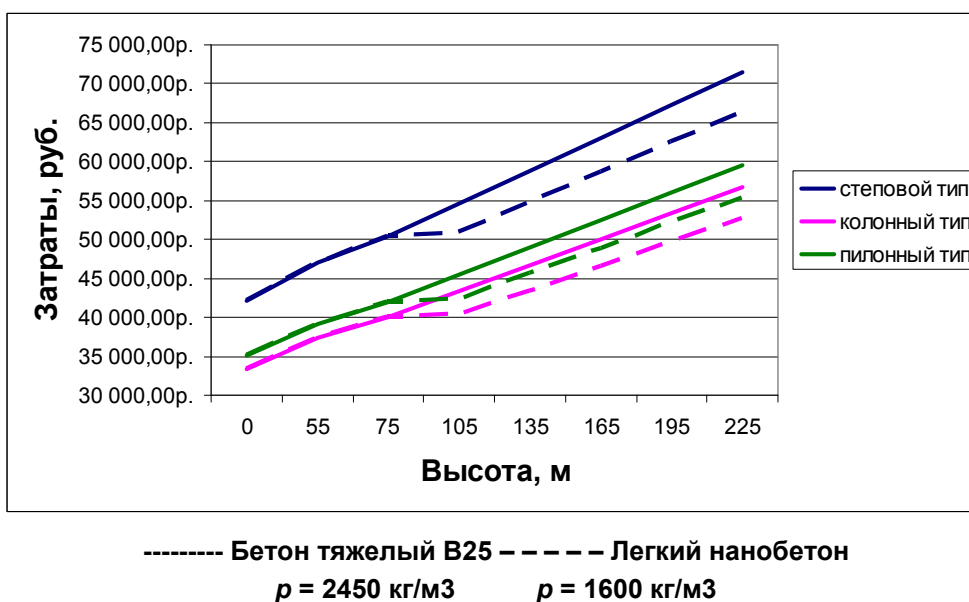


Рисунок 9. Зависимость величины затрат на производство работ от высоты здания

Выполненные оценки наглядно показывают, что экономическая эффективность применения легкого нанобетона в высотном строительствекратно увеличивается, начиная с отметки в 74 м и в целом составляет не менее 30%. Также достаточно интересным, с нашей точки зрения, направлением использования легкого конструкционного бетона является решение с его помощью задач строительства, или, точнее, изготовления перемещаемых модульных конструкций, таких, как трансформаторные подстанции, корпуса компрессорных и насосных сооружений и т.д.

О возможности использования легкого наноструктурированного бетона в сейсмостойком строительстве

Бетон легкий наноструктурированный ТУ 5789-035-23380399-2008 (БЛН), апробированный в строительстве автодорожных мостов, в том числе моста через Волгу в г.Кимры, через реку Вятку в Кировской области и др., отличается уникальным набором характеристик, которые позволяют рекомендовать его использование при решении различных задач, в том числе высотного и сейсмостойкого строительства. Как указано выше, легкий литой (П4-П5) нанобетон обладает прочностью на сжатие 45-55 МПа и более, водонепроницаемостью на уровне W14-20, морозостойкостью более чем F350, температурой начала обсыпания не менее, чем 600° С и плотностью в 1,5-1,6 т/м³. Существенными основаниями для его применения в сейсмостойком строительстве являются высокие трещиностойкость и диссипирующая способность этого материала по отношению к энергии внешнего воздействия, а также резко повышенная работа полного разрушения, отличающаяся от классических конструкционных марок (B25-B45) обычного тяжелого (2,45 т/м³) бетона в большую сторону, не менее, чем вдвое. Известен факт, что высокопрочные бетоны (B45 и более) при достижении предельных нагрузок разрушаются практически со взрывом. БЛН демонстрирует диаметрально противоположные качества – он обладает определенной «запредельной» прочностью, т.е. после начала хрупкого разрушения требуются дополнительные усилия и дополнительная работа для полного разрушения деталей из такого бетона.

При выполнении работ по сейсмоусилению сооружений, с одной стороны, БЛН позволяет экономить трудоемкость, связанную с увеличением стоимости укладки бетона на отметках, повышенных относительно уровня земли, с другой стороны, дает возможность, вследствие его высокой подвижности, выполнять эти работы в рамках ускоренных производственных циклов. Изготовление из БЛН строительных конструкций малой толщины и большой площади возможно заливкой растворами бетонных смесей с подачей их бетононасосом, что соответствует задачам внешней аппликации стеновых элементов. При использовании БЛН в качестве основного материала в монолитном домостроении совершенно по-новому можно формировать подход к решению задач сейсмоизоляции зданий. При облегчении здания вдвое (что обеспечивается применением БЛН) требуется, по крайней мере, вдвое меньшее количество однотипных сейсмоизоляторов, что, в свою очередь, серьезно уменьшает смету расходов при использовании высококачественных сейсмоизолирующих устройств. Либо становится возможен переход к упрощенным, менее нагруженным устройствам. Одновременно, само исполнение бетонных элементов сейсмоизоляторов из БЛН повышает надежность и безопасность при их эксплуатации в реальных сейсмических условиях.

О перспективах и эффективности применения легкого наноструктурированного бетона в строительстве зданий и сооружений

Исходя из изложенного и обобщая результаты, зафиксированные при практическом применении БЛН, а также результаты проектных оценок применительно к ряду исследованных строительных конструкций, в том числе высотных, можно сделать следующие выводы о полезных технических и экономических эффектах использования БЛН:

1. Снижается вес и повышается несущая способность отдельных конструкций, вследствие чего уменьшаются сечения стальных армирующих элементов и объемы укладки бетона не менее, чем на 30%.
2. Изменяется система армирования и уменьшается количество потребляемой арматуры.
3. Уменьшается нагрузка на грунт от сооружения в целом, вследствие чего упрощаются конструкции фундаментов и более, чем вдвое, снижаются объемы работ нулевого цикла.
4. Из конструкций сооружений исключается специальная и общая гидроизоляция.
5. Не менее чем на 30% удешевляются и ускоряются работы по строительству высотных монолитных железобетонных конструкций.
6. Повышается пожарная безопасность зданий и сооружений.
7. Снижаются затраты на элементы опалубки за счет уменьшения ее толщины и веса и увеличения эксплуатационного ресурса.
8. Обеспечивается экономия затрат на монтаж сейсмоизоляторов за счет уменьшения их количества, либо снижения класса и несущих способностей в районах высокой сейсмической активности.
9. Повышаются надежность и безопасность сейсмостойкого строительства в целом

Выводы

Рассмотренный и проанализированный набор методов и средств формирования свойств высококачественных бетонов с применением наноматериалов и соответствующих технологий, в том числе предложенных авторами настоящей работы, открывает систему совершенно новых возможностей для перехода строительного материаловедения на принципы создания материалов с заданными свойствами в диапазоне очень высоких значений их параметров. В свою очередь, это позволит в самое ближайшее время обогатить возможности проектировщиков в принятии изящных и экономически оправданных конструкторско-технологических решений при проектировании зданий и сооружений новых типов, в первую очередь, высотных, а также сооружений в регионах повышенной сейсмической активности.

Практический опыт, уже полученный авторами по применению БЛН в мостостроении, а также в строительстве легких транспортируемых модульных сооружений, дает основания для оптимистического прогноза широкого промышленного использования методов нанотехнологии и уже созданных новых материалов в самых разных областях строительной индустрии. При этом авторы хотели бы отметить высокую синергическую эффективность совместного применения нескольких различных методов и материалов, полученную при создании БЛН и его аналогов.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-08-00151а.

Литература

1. Sobolev K., Ferrada-Gutierrez V. How Nanotechnology Can Change the Concrete World Part 2. // AMERICAN CERAMIC SOCIETY BULLETIN, №1, 2005. Pp. 16-19.
2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны.- М, 1990. С. 132.
3. Ваучский М.Н. Направленное формирование упорядоченной надмолекулярной кристаллической структуры гидратированных минеральных вяжущих // Вестник гражданских инженеров, №2(3). С 44-47.
4. Пономарев А.Н., Ваучский М.Н., Никитин В.А., Прокофьев В.К., Шнитковский А.Ф., Заренков И.Д., Добрица Ю.В. Композиция для получения строительных материалов. Патент РФ № 2233254, приоритет от 26.10.2000.
5. Пономарев А.Н. Перспективные конструкционные материалы и технологии, создаваемые с применением нанодисперсных фуллероидных систем // Вопросы материаловедения, т 26, №2, 2001. С. 65.
6. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепция и проблемы // Строительные материалы, №7, 2007. С. 2-4.
7. Юдович М.Е., Пономарев А.Н., Гареев С.И. Поверхностно-активные свойства наномодифицированных пластификаторов // Строительные материалы, №3, 2008. С. 2-3.
8. Епифановский И.С., Пономарев А.Н., Донской А.А., Каширин С.В. Модификация свойств полимерных материалов малыми концентрациями фуллероидов // Перспективные материалы, №2, 2006. С. 15-18.
9. Пономарев А.Н., Белоглазов А.П. Нанокompозитная арматура. Заявка РФ на полезную модель № 2009120764/22(028683), решение ФИПС о выдаче патента от 06.08.2009.
10. Danilov O.B., Belousova I.M., Belousov V.P., Mak A.A., Grenishin A.S., Kiselev V.M., Krysko A.V., Muraveva T.D., Ponomarev A.N., Sosnov E.N. Fullerene-oxygen-iodine laser (FOIL). Physical principles – Proceedings of SPIE, V. 5479, 2004. Pp. 29-34.
11. Пономарев А.Н., Юдович М.Е., Груздев М.В., Юдович В.М. Взаимодействие электрического поля с неметаллическими наночастицами. Часть I. Теоретическая оценка топологического фактора // Нано- и микросистемная техника, № 6, 2009. С. 45.
12. Shames A.I., Katz E.A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I.M., Ponomarev A.N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // Diamond & Related Materials, №2, 2009. P. 15.
13. Патент США №5613334 на изобретение, МПК6 E 04L 5/08, приоритет от 25.03.1997.
14. Пономарев А.Н., Юдович М.Е. Бетонная смесь. Патент РФ №2355656, приоритет от 10 мая 2007.

**Андрей Николаевич Пономарев, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)575-39-29; эл. почта: 9293522@gmail.com