

Батяновский Эдуард Иванович, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология бетона и строительные материалы», БНТУ

Якимович Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий научно-исследовательской и испытательной лаборатории бетонов и строительных материалов, БНТУ

Рябчиков Павел Владимирович, младший научный сотрудник научно-исследовательской и испытательной лаборатории бетонов и строительных материалов, БНТУ

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ, ВКЛЮЧАЯ НАНОУГЛЕРОДНЫЕ ДОБАВКИ.

FEATURES OF TECHNOLOGY OF HIGH-STRENGTH CONCRETE ON DOMESTIC MATERIALS, INCLUDING NANOCARBON ADDITIVES.

АННОТАЦИЯ

В статье приведена информация о особенностях технологии изготовления высокопрочных бетонов на материалах, используемых в строительной отрасли Беларуси, а также возможности их модификации отечественными углеродными наноматериалами, полученными в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси.

ABSTRACT

In article the information on features of manufacturing techniques of high-strength concrete on the materials used in building branch of Belarus, and also possibility of their updating domestic carbon nanomaterials, received in Institute of Heat and Mass Transfer of NAS of Belarus.

ВВЕДЕНИЕ

Технология высокопрочных бетонов характеризуется рядом отличий от «рядовых» бетонов, которые в основном связаны со спецификой составов высокопрочных бетонов, повышенными тре-

бованиями к качеству составляющих бетона (вяжущего, мелкого и крупного заполнителей), а также дополнительных ингредиентов в виде высококачественных пластифицирующих добавок, активных (микрокремнезем) и «неактивных» (каменная мука) минеральных добавок. У каждого из дополнительных ингредиентов собственная «роль» в становлении и формировании структуры цементного камня из бетона, что в совокупности обеспечивает повышенную плотность и прочность затвердевшего цементного камня, высокое качество сцепления его с поверхностью зерен заполнителей, а в результате – формирование микро- и макроструктуры бетона с минимальным количеством дефектов, т.е. разнообразных (по размерам сечений, длине, конфигурации и т.п.) пор. Именно дефекты структуры цементного камня и бетона, являющиеся концентраторами напряжений, возникающих в бетоне под нагрузкой, способствуют появлению и развитию (росту) в нем трещин, приводящих к разрушению материала от механических нагрузок.

Одновременно высокая плотность цементного камня и бетона в целом обеспечивает материалу непроницаемость для агрессивных реагентов (как по отношению собственно к бетону, так и по отношению к арматуре), чем обеспечивается повышенная долговечность строительных конструкций.

Эти упрощенно изложенные факторы предопределяют роль, значимость и перспективность использования высокопрочных особо плотных бетонов наряду с основным их достоинством – повышением несущей способности работающих на сжатие строительных конструкций (колонны, опоры и др. несущие элементы зданий и сооружений).

Вместе с тем повышение прочности бетона в мировой практике строительства до 120...150 МПа выявило противоречие, заключающееся в отставании «прироста» прочности на растяжение таких бетонов. Сущность проблемы заключается в том, что не только «работающие» на растяжение (или на изгиб в зоне растяжения) строительные конструкции, но и сжатые бетонные (железобетонные) элементы зданий и сооружений «исчерпывают» несущую способность и разрушаются при предельных нагрузках из-за недостаточной прочности бетона на растяжение. Особенностью (опасной с позиций надежности несущих строительных конструкций при эксплуатации) высокопрочных бетонов (фак-

тически при $f_c \geq 70-80$ МПа) является их возрастающая хрупкость. Она проявляется в снижении пластических деформаций в бетоне под нагрузкой. В результате высокопрочный бетон при предельных нагрузках разрушается практически мгновенно, что представляет серьезную угрозу безопасной эксплуатации зданий (сооружений) в чрезвычайных ситуациях (при превышении расчетных нагрузок; появлении непредусмотренного расчетом эксцентриситета в сжатых элементах (колонны, опоры и т.д.), пожарах и др.).

Поэтому одной из важнейших задач развития и совершенствования технологии высокопрочного бетона, наряду с обеспечением прочности на сжатие, является повышение его «деформативности» и прочности на растяжение. В этой связи введение в высокопрочный бетон (точнее, в цементный камень, как составляющей бетона) волокнообразных углеродных наноматериалов (УНМ) может способствовать росту его прочности на растяжение за счет эффекта «наноармирования» и, тем самым, в какой-то мере позволит решить проблему повышения его деформативности, что было установлено авторами в исследованиях, относящиеся к «рядовому» бетону прочностью 60–87 МПа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

В исследованиях, отраженных в статье, использованы материалы со следующими характеристиками, возможное изменение которых приводится дополнительно для конкретных экспериментов.

Вяжущие – портландцемент ОАО «Кричевцементошифер» и ОАО «Красносельскцемент» марки: М500-Д0, активностью: $R_{cc} \sim 50$ МПа; показателем нормальной густоты (НГ) 25-28 %.

Песок – природный; с модулем крупности: $M_x \sim 2,8-3,0$; насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1580$ кг/м³.

Щебень гранитный (Микашевичи) фракции 5 – 10 и 10 – 20 мм; прочностью (по дробимости) 110 МПа, насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1380$ кг/м³; плотностью зерен: $\rho_3^0, 2700$ кг/м³.

Щебень гранитный кубовидный фракции 2 – 4 и 4 – 6,2 мм; прочностью (по дробимости) 110 МПа, насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1360-1420$ кг/м³; плотностью зерен: $\rho_3^0, 2700$ кг/м³

Микрокремнезем – с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании не более 4,0%; удельная поверхность (по методу БЭТ) $\sim 15,0 \text{ м}^2/\text{г}$.

Гранитный отсев – насыпной плотностью: $\rho_0 \sim 1550 \text{ кг/м}^3$; плотность измельченной горной породы: $\sim 2740 \text{ кг/м}^3$; отсев молоты в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности (по прибору типа ПСХ) $S_{\text{уд}} \sim 3000 \dots 3300 \text{ см}^2/\text{г}$; средняя насыпная плотность порошка: $\rho_{\text{к.н.}}^0 \sim 950 \text{ кг/м}^3$.

Молотый гранитный отсев использовали в качестве структурирующего компонента композиционного вяжущего для высокопрочных бетонов, включающего цемент, микрокремнезем и «каменную» муку, дисперсность которой ($S_{\text{уд}}$) должна быть на уровне дисперсности (тонкости помола) цемента.

Добавка-гиперпластификатор «Стахемент 2000» – это пластифицирующая добавка для бетонных смесей и растворов отечественного производства. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112-98 (суперпластификаторы с повышенным водоредуцирующим эффектом).

Характеристика использованных углеродных наноматериалов. Для осуществления экспериментов институтом «ИТМО» им. А.В. Лыкова НАН Беларуси предоставлялись разновидности УНМ, информация о составе которых (химическом и вещественном) является интеллектуальной собственностью организации-разработчика.

Вследствие малого собственного размера частицы УНМ при комнатной температуре и атмосферном давлении начинают «самоорганизовываться», объединяясь и укрупняясь до микроскопических «гранул». Процесс образования гранул обусловлен наличием сил Ван-дер-Ваальса, которые действуют между отдельными углеродными наночастицами. Это свойство УНМ препятствует прямому получению материала из отдельных, «независимых» друг от друга частиц, а в результате понижает эффективность их влияния на характеристики цемента и бетона, поскольку УНМ, полученный из реактора, представляет собой полидисперсный самопроизвольно «сгруппировавшийся» материал, состоящий из укрупненных гранул микронного размера. В результате может быть существенно снижена удельная поверхность и энергетическая активность веще-

ства УНМ. Поэтому одной из ключевых проблем последующего равномерного распределения вещества УНМ в объеме бетонной смеси в виде отдельных элементарных частиц и достижения наибольшей эффективности в бетоне является диспергация исходного материала при его «очистке» на стадии получения и на стадии введения в бетон. В экспериментах использовали твердофазные углеродные наноматериалы; примененная разновидность УНМ означена в конкретных данных, характеризующих соответствующие эксперименты.

Общая методика исследований, выполненных с целью установления закономерностей воздействия нанодобавок на физико-технические свойства высокопрочного бетона, заключалась в следующем.

На начальном этапе были подобраны составы бетона, обеспечивающие разный уровень его прочности на сжатие в диапазоне значений 60–140 МПа, характеризующиеся расходом цемента 440–650 кг, микрокремнезема и каменной муки в количестве 15–30% от массы цемента, водоцементным отношением В/Ц $\sim 0,35$ –0,23. Затем в бетон различной прочности вводили добавку УНМ в установленном ранее оптимальном количестве, соответствующим по данным ранее выполненных исследований [1,2] 0,05 % от массы цемента (МЦ).

Для каждого уровня прочности (60; 80; 100; 120; 140 МПа) изготовлены образцы бетона для оценки ее зависимости от вида введенного УНМ. Кроме этого изменяли способ введения УНМ: при предварительном смешивании вещества УНМ с песком, микрокремнеземом (при его наличии в составе), с частью воды затворения с целью определения наиболее эффективной разновидности используемых УНМ и способа его введения.

Особенностью составов высокопрочных бетонов с показателем прочности в 100 МПа и более заключается в необходимости дополнительных мер по структурированию твердеющего цементного камня, так как для обеспечения повышенной плотности цементного камня за счет применения качественных пластифицирующих химических добавок и соответствующего снижения начального водосодержания бетона (водоцементного отношения) в этом случае недостаточно.

Кроме этого необходимо введение в реагирующую систему «цемент-вода» активного (аморфного) микрокремнезема, содержащего SiO_2 не менее 85% по массе при удельной поверхности $S_{\text{уд}} \geq 15,0 \text{ м}^2/\text{г}$ (по адсорбции азота) [3]. Механизм действия этого компонента двоякий: с одной стороны, зерна микрокремнезема размерами менее $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и обладающие «химическим родством» к формирующимся гидросиликатам кальция в реагирующем цементном тесте выполняют роль центров кристаллизации. В их присутствии образование гидрокристаллов кальция идет ускоренно. С другой стороны, аморфный кремнезем способен реагировать с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующейся от реакций гидратации силикатных клинкерных минералов: алита – $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и белита – $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, составляющих до (75–80) % от массы клинкера в цементе. Результатом этой реакции является образование более прочных (чем $\text{Ca}(\text{OH})_2$) соединений – гидросиликатов кальция, что в целом приводит к росту плотности и прочности цементного камня и бетона.

Однако и введения только микрокремнезема недостаточно для бетонов прочностью в 120–150 МПа. В такие составы требуется введение тонкомолотого твердофазного компонента в виде каменной (преимущественно – базальтовой) муки. С одной стороны, этот компонент выполняет роль стабилизирующей подвижные и литые бетонные смеси добавки, предотвращающий их расслоение. А с другой, он действует двояко: обеспечивает на некоторый период запас воды (адсорбированной на его зернах), которая затем «уходит» на продолжение реакций гидратации цемента. Кроме этого, мельчайшие частицы высокопрочного базальта (горная порода прочностью до 500 МПа) дополняют микроструктуру цементного камня, уплотняя и упрочняя ее.

Отсутствие в Беларуси базальтов предопределило использование каменной муки в виде молотого гранита (отсевов производства щебня для бетона на РУПП «Гранит»), характеризующегося меньшей прочностью горной породы: 100–250 МПа.

Следует отметить, что в мировой практике исследований и практического применения высокопрочных бетонов дозировка «МК» и каменной муки достигает 30 % от массы цемента при обеспечении прочности бетона (содержащего заполнители –

кварцевый песок крупностью до 0,8 мм и базальтовый щебень фракции 2–5 мм), примерно равной 150–160 МПа [4].

Твердение образцов бетона (кубы с ребром 70x70x70 мм) осуществлялось по разным режимам.

Режим 1. Естественное твердение образцов при стандартизированных условиях в камере нормально-влажностного твердения (НВТ; температура 20 ± 3 °С и относительная влажность $\geq 90\%$).

Режим 2. С кратковременным нагревом, включая предварительную выдержку после изготовления образцов 2–2,5 ч, тепловую обработку в термостате (над водой) при температуре 40–50 °С в течение 2,5–3,0 ч, затем обогрев отключался, и образцы остывали в емкости термостата до утра (~12 ч), после чего одни серии испытывали, а другие образцы до момента испытания хранили в камере НВТ.

Режим 3. С высокотемпературным нагревом, включая предварительную выдержку после изготовления образцов 2–2,5 ч, тепловую обработку в термостате при температуре 80–85 °С в течение 4,0 ч; обогрев отключали и образцы остывали в термостате до утра (~12 ч), часть образцов испытывали, остальные до момента испытания хранили в камере НВТ.

Режим 4. Твердение образцов в условиях гидроизоляции (под пленкой) в сушильном шкафу при температуре 40 °С и относительной влажности $f \sim 60\%$ до испытаний.

Особенности испытаний образцов высокопрочного бетона по ГОСТ 10180 [5], заключаются в учете масштабного фактора посредством поправочного коэффициента ($\alpha_{70} = 0,85$; $\alpha_{100} = 0,95$; $\alpha_{200} = 1,05$) или определяется по стандартной методике сравнительных испытаний образцов указанных типоразмеров при прочих равных условиях.

Анализ величин поправочных коэффициентов (при $\alpha_{150} = 1,0$) показывает, что образцы меньших типоразмеров завышают значение прочности, относительно базового типоразмера при прочих равных условиях.

Для бетонов (растворов) рядовых (прочность до 60–70 МПа) этот эффект имеет место. Проявляется он из-за наличия сил трения – сцепления между поверхностью бетона образцов с поверхностью плит пресса в процессе испытаний. Чем меньше (в пределах типоразмеров по стандарту) сечение (площадь контакта) образца,

в тем большей степени эти силы препятствует развитию поперечных деформаций в нем, что и приводит к завышению показателя прочности, в сравнении с базовым (150 мм) типоразмером.

Однако прямыми испытаниями различных по типоразмерам образцов высокопрочных бетонов (70–120 МПа) подтверждено [6–8], что за пределами прочности бетона в 70 МПа это правило нарушается. Бетон такого (и более высокого) уровня прочности разрушается хрупко (практически мгновенно), а показатель прочности одинаков у образцов различных (70; 100; 150 мм) типоразмеров. Соответствующее обоснование этого положения будет дано в последующих исследованиях. В настоящей статье результаты испытаний образцов бетона (типоразмер – 70 мм) приведены двояко: с учетом $\alpha = 0,85$ и при $\alpha = 1,0$.

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

РЕЖИМ И ВРЕМЯ ТВЕРДЕНИЯ. Эксперименты выполнены здесь и далее, на бетоне состава, характеризующемся номинальной проектной прочностью $f_{c,28} \geq 100$ МПа, при расходе цемента марки М500 (класс – СЕМ I 42,5 R), равном 500 кг на 1 м³ бетона.

Режимы твердения образцов соответствовали ранее приведенным; образцы, твердевшие по режимам № 2 и № 3, до испытаний в возрасте 7, 14, 28, 45 и 90 сут хранились в камере нормально-влажностного твердения (НВТ).

Из результатов экспериментов, приведенных на рис.1, можно сделать следующие выводы.

1) Фактически любая тепловая интенсификация твердения высокопрочного бетона относительно нормальных ($t \sim 20 \pm 3$ °С) условий его твердения сопровождается повышением темпа роста прочности в начальный период (1...3 сут.; до 7 сут. при $t = 40$ °С), но приводит к снижению прочности как в проектном, так и в более «зрелом» возрасте (45 и 90 сут.).

2) Твердение высокопрочного бетона при постоянной повышенной температуре среды (~ 40 °С) неоднозначно влияет на кинетику роста его прочности. В частности, в начальный период твердения (до 7 сут.) прочность (образцы были гидроизолированы, т.е. испарение из бетона воды исключено) твердевшего при 40 °С бето-

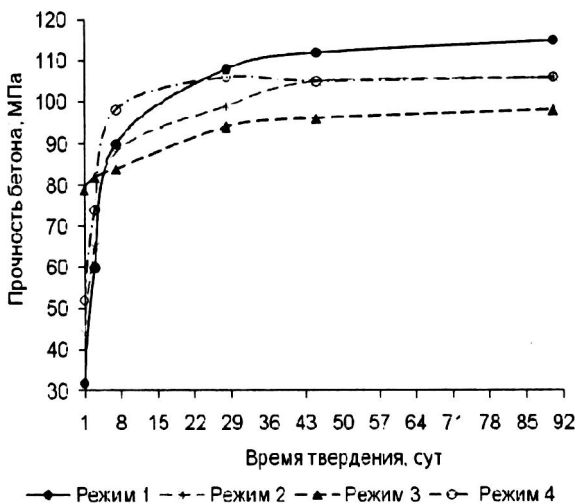


Рис. 1. Изменение прочности высокопрочного бетона от режима твердения

на была выше ее значений для образцов нормально-влажностных условий твердения. Однако к 14–18 сут. твердения значения прочности в означенных случаях сравнялись, а к проектному и более позднему возрасту (45–90 сут.) прочность образцов, твердевших при 40 °С (режим № 4), оказалась ниже прочности образцов-аналогов, но твердевших при более благоприятных нормально-влажностных условиях (режим № 1).

Следует отметить, что при $t \sim 40$ °С бетон достиг практически проектной прочности к 7 сут. твердения. Одновременно, можно сделать вывод о необходимости ухода (гидроизоляции) за бетоном в этом случае не менее, чем в течение 7 сут., так как в противном случае (особенно при испарении воды затворения) бетон не достигнет расчетной проектной прочности.

3) Повышение температуры твердения высокопрочного бетона сверх 40 °С однозначно сопровождается ее «недоработкой» в проектном возрасте, составляющем для $t = 50$ °С до 10 %, а для $t \sim (80-85)$ °С – до 15 %. Эта тенденция сохраняется к 45 и 90 сут. твердения бетона.

Этот отрицательный эффект связан с ускоренным образованием вокруг цементных «ядер» реакционных оболочек (каемок) из

новообразований (гидросиликатов кальция, алюминатов и ферритов и пр. от реакций клинкерных минералов с водой затворения). Их «раннее» уплотнение вследствие интенсификации процессов гидролиза и гидратации под воздействием повышенной температуры приводит к замедлению и даже прекращению химических реакций цемента, т.к. молекулы воды с затруднением или вовсе не могут диффундировать сквозь уплотнившиеся слои гидратов к реакционноспособным поверхностям вяжущего.

Это явление в особой степени относится к высокопрочным бетонам, т.к. они характеризуются низким начальным водосодержанием, т.е. малым количеством воды затворения. В результате такой бетон при повышении температуры быстро набирает прочность, но ее абсолютный уровень понижается.

ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ. В настоящих экспериментах (при прочих равных условиях) варьировали содержание в составе бетона количество микрокремнезема (МК) и каменной муки (КМ) – (молотого гранитного отсева) при постоянном расходе цемента 500 кг. Количество МК и КМ изменяли от 0 до 30 % от массы цемента и вводили в бетон в соотношении МК:КМ=1:1. Во всех случаях при корректировке водосодержания бетона сохраняли примерно равной консистенцию бетонной смеси (ОК ~ 6-8 см).

Режимы твердения бетона были приняты № 1 (НВТ) и № 2 (нагрев до 50 °С) с целью ускорения твердения бетона.

Данные, приведенные на рис. 2 и 3, свидетельствуют и подтверждают выводы предыдущего пункта, о влиянии повышенной температуры на прочность бетона.

Очевидна роль микронаполнителей в виде микрокремнезема и молотого гранитного отсева. Так, с ростом их дозировки прочность бетона (при прочих равных условиях) возрастает. При этом более значительно в первые сутки твердения с начальным подогревом бетона.

В дальнейшем (до 90 сут твердения) эффективность этих добавок в бетоне сохраняется в виде устойчивой тенденции роста его прочности.

Учитывая полученные экспериментальные данные и опыт зарубежных исследований, увеличение дозировки МК и КМ до максимума (т.е. до 30 % от МЦ) целесообразно для бетонов проч-

ностью более 120 МПа; для принятого за базовый состав – бетон прочностью в 100...110 МПа, рациональной следует считать содержание МК и КМ в количестве 15 % от массы цемента.

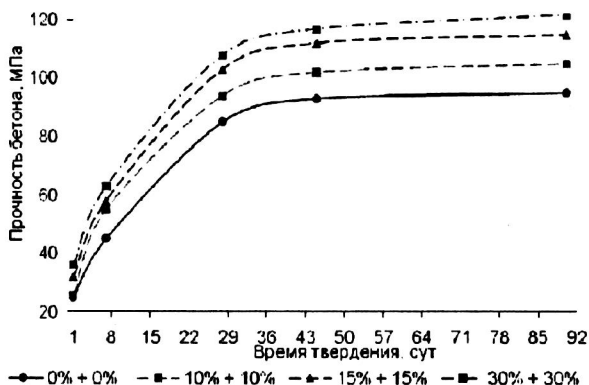


Рис.2. Изменение прочности высокопрочного бетона от количества микрокремнезема и каменной муки (твердение в НВТ)

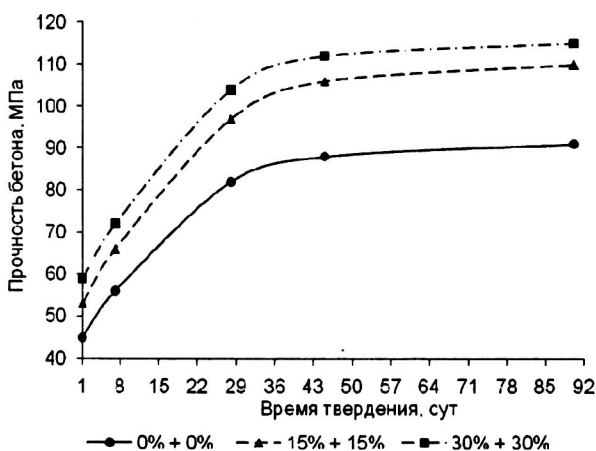


Рис.3. Изменение прочности высокопрочного бетона от количества микрокремнезема и каменной муки (кратковременный нагрев до 50 °C)

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ПЛАСТИФИКАТОРА. В этих экспериментах оценивалась возможность влияния вещества добавки пластификатора в дозировке (1–3) % по жидкому веществу (концентрация раствора в диапазоне 30–36%, что соответствовало ее дозировке в 0,3–1,0% по сухому веществу относительно массы цемента).

Цель эксперимента заключалась в определении рациональных дозировок добавки в бетон по критерию изменения его прочности при одновременном изменении консистенции бетонной смеси. С ростом дозировки раствора добавки от 1 % от 3 % (0,3–1,0 по сух. вещ.). Консистенция бетонной смеси изменяется от марок П2 – П3 до П5 (т.е. до консистенции литой смеси).

Результаты экспериментов приведены на рис. 4 и из них следует, что для проектного возраста бетона состава: Ц ~ 500 кг; МК ~ 15 %; КМ ~ 15 %, оптимальная дозировка добавки-пластификатора соответствует (1–2) % при дозировании ее в виде раствора 0,3–0,6 % по сухому веществу. Данные о прочности бетона к 45–90 сут. твердения свидетельствуют об изменении ситуации. В частности, образцы бетонов составов с дозировкой пластификатора в 3 % (1 % по сухому веществу) от массы вяжущего (совместно: цемент+микрокремнезем) к 45 сут. твердения в большей степени «нарастили» прочность и к 90 сут. превысили ее значения относительно прочности образцов с 1–2 % добавки-пластификатора. Очевидно к этому времени твердения бетона в благоприятных условиях самоликвидировалось «адсорбционно-тормозящее» действие молекул ПАВ добавки и, наоборот, проявился фактор снижения (за счет ее введения в большем количестве) водосодержания бетона. Результатирующим следствием является рост плотности цементного камня и бетона в целом, что отразилось в росте прочности последнего к возрасту 90 сут.

Следует отметить, что в этом случае не изменяли расход цемента, МК и КМ. С увеличением количества микронаполнителя не исключен рост оптимума в расходе добавки уже к проектному возрасту (28 сут.).

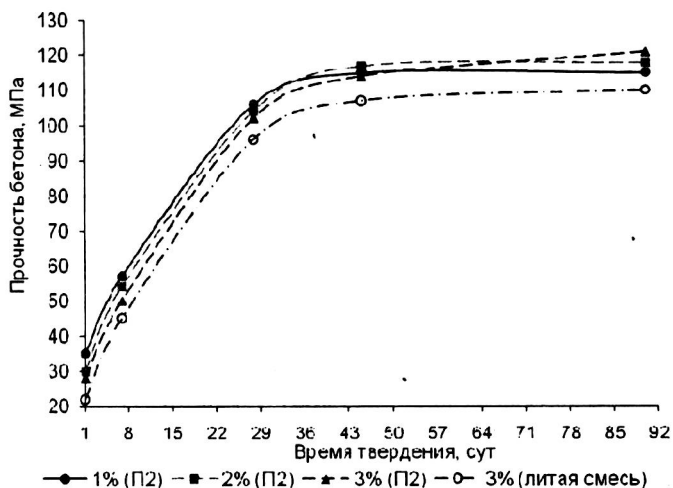


Рис.4. Изменение прочности высокопрочного бетона от количества добавки пластификатора (твердение в НВТ)

ВЛИЯНИЕ УНМ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА. Эксперименты по данному направлению находятся в стадии постоянного выполнения.

Здесь приводятся данные, относящиеся к использованию УНМ разновидностей: «суспензия» и «осадок»; состав бетона одинаков с ранее приведенными экспериментами.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные о влиянии УНМ в дозировке 0,05 % от массы цемента на прочность образцов бетона, твердевшего в нормально-влажностных условиях (а) и с кратковременным нагревом (б), из которых следует, что введение УНМ способствовало повышению прочности бетона. Для бетона зафиксирован рост прочности в проектном возрасте на 10-15 %. При этом прочность бетона в первые 24 ч увеличилась на 25-30 %. К 90 сут. твердения эта тенденция сохранилась: увеличение прочности бетона за счет введения УНМ составило 10 ± 2 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований кинетики твердения бетона со щебнем (высокопрочного бетона), отраженной данными контроля его

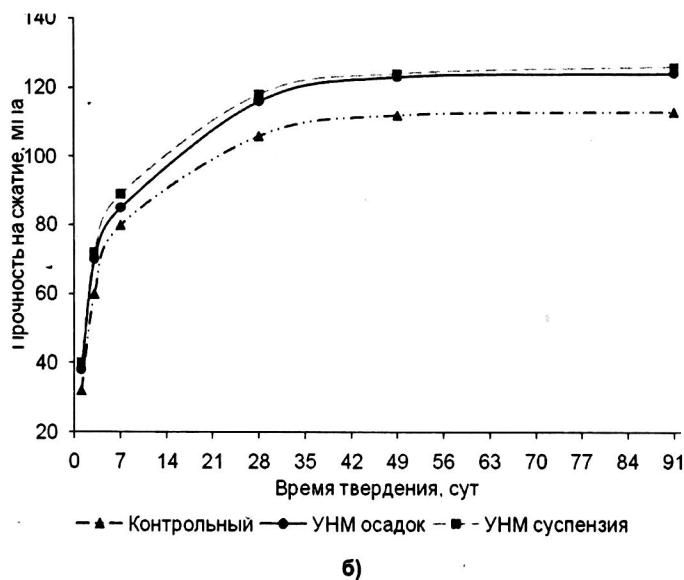
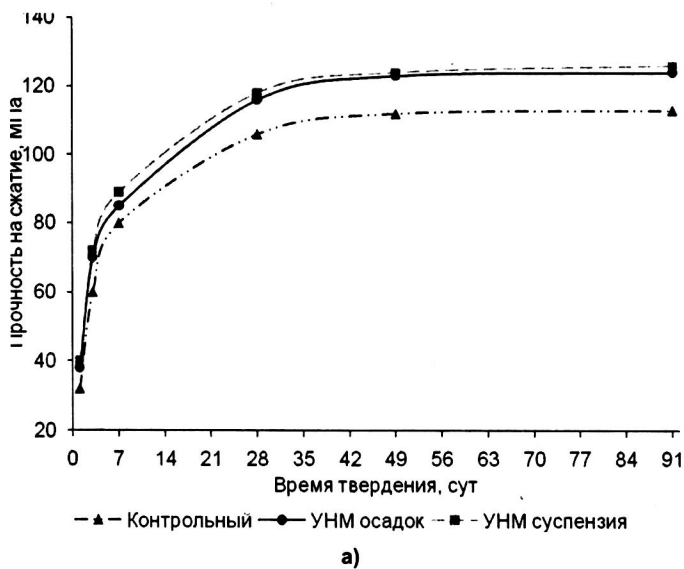


Рис. 5. Изменение прочности высокопрочного бетона от вида УНМ (а- твердение в НВТ; б- кратковременный нагрев до 50 °С)

прочности в течение до 90 сут, показали, что при благоприятных условиях (включая твердение при температуре 40-50 °С, но в условиях гидроизоляции) наращивает прочность, относительно ее значений для проектного (28 сут) возраста.

При этом наиболее стабильные и высокие по значениям данные получены для стандартизированных (нормально-влажностных (относительная влажность $\phi \geq 90\%$; температура $t \sim (20 \pm 3) \text{ } ^\circ\text{C}$) условий.

Выявлено, что при средней температуре среды твердения $t \sim 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ и гидроизоляции при этом поверхности бетона, его проектная прочность достигается, примерно, к 7 сут. Это означает, что рекомендуемая продолжительность ухода за бетоном в аналогичных условиях твердения строительных конструкций соответствует 7 сут.

Установлено, что кратковременный разогрев высокопрочного бетона в первые 24 ч твердения до температуры $\sim 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ допустим с позиций обеспечения его проектной прочности и ее роста в дальнейшем.

Влияние использованных в экспериментах разновидностей УНМ проявляется в росте прочности бетона до 30 % в первые сутки твердения, до 15 % в проектном возрасте и до 10 % к 90 сут. твердения бетона. Установленная закономерность проявления большей эффективности в начальные сроки твердения бетона с последующим «сближением» значений прочности при увеличении возраста материала является подтверждением воздействия УНМ на процессы гидролиза – гидратации цемента, которые наиболее интенсивно развиваются в 24...72 ч твердения вяжущего (от момента затворения его водой). Высокопрочные бетоны не отличаются в данной тенденции от традиционных.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Батяновский, Э.И. Нанотехнологии и углеродные наноматериалы в строительном материаловедении./ Э.И. Батяновский, П.В. Рябчиков, В.Д. Якимович // Строительная наука и техника. – 2009. – №3(24). – С.22–29.

2. Батяновский, Э.И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня./ Э.И. Батяновский,

А.В. Крауклис, П.П. Самцов, П.В. Рябчиков, П.П. Самцов // Строительная наука и техника. – 2010. – № 1-2(28-29). – С.3-10.

3. СТБ EN 197-1-2007. Цемент Ч.1. Состав, спецификации и критерии соответствия общих цементов.

4. Yamada, K. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer/ К. Yamada, Т. Takahashi, S. Hanehara, М. Matsuhisa// Cement and Concrete Research. – 2000. – № 30. – P. 197-207.

5. ГОСТ 10180-90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

6. Батяновский, Э.И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей: дис. ... докт. техн. наук: БНТУ. – Минск, 2002. – 351 с.

7. Цискрели, Г.Д., Лекишвили, Г.Л. О масштабном эффекте в бетонах // Бетон и железобетон. – 1966. – № 10. – С. 29-31.

8. Свиридов, Н.В., Коваленко, М.Г. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементях// Бетон и железобетон. – 1990. – № 2. – С. 21-22.