

плен со Ш–М. Отсутствие потребности в мелких крепежных деталях на ЛТП позволяет не только экономить металл, но и устранить места концентрации напряжений и образования мест повышенного разрушения элементов трамвайного пути. Соответственно продлится межремонтный период, ЛТП становится долговечнее трамвайного пути на рельсошпальной решетке.

На ЛТП концентрация напряжений имеет место лишь при передаче нагрузки от колеса вагона на рельс. Далее рельс делает нагрузку распределенной и через резиновую прокладку перераспределяет на железобетон Ш–М, балласт и основание. Поэтому ЛТП, в отличие от пути на рельсошпальной решетке, где сосредоточена передача нагрузки и на шпалу, и в скреплении рельса со шпалой, будет, конечно же, долговечнее.

При строительстве ЛТП применяются те же материалы, что и при строительстве железнодорожного пути на рельсошпальной решетке, значит, в этом плане долговечность и надежность пути не ухудшаются. Если же учесть, что НДС конструкции из этих материалов на ЛТП уменьшится, то соответственно появляется дополнительная гарантия не снижения надежности и долговечности, а их увеличения.

Ленточное расположение конструктивных элементов ЛТП делает легко осуществимой механизацию производства работ при его строительстве, что, несомненно, повысит качество и постоянство его параметров. Например, механизация работ по предварительному обжатию неоднородных грунтов придаст постоянство их механическим характеристикам уже в строительный период.

Укладка рельса внутрь Ш–М резко понизит уровень шума от движущегося трамвая, так как удар колеса по рельсу наносится в том месте, где рельс наиболее сильно зажат в ней [5].

В заключение можно констатировать, что сопоставительный анализ ленточного трамвайного пути и пути на рельсошпальной решетке свидетельствует о надежности и долговечности ЛТП.

Список литературы

- 1 Суходоев В. Н. Рельсовый путь улучшенных параметров // Вестник БНТУ. – 2002. – № 4. – С. 9–11.
- 2 Титов В. П., Хромов В. И. Прибор для измерения упругих осадок земляного полотна при проходе транспорта // Тр. к VIII Междунар. конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – М.: СИ, 1973. – С. 205.
- 3 Суходоев В. Н., Трушкина А. В. О стабильности упругих свойств системы рельсового пути. – Мн., 2000. – С. 8. Деп. в ВИНТИ 16.11.2000 г. № 2914-62000.
4. СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений. – М.: СИ, 1975. – 32 с.
5. Суходоев В. Н. Ленточный путь избавления от грохота // Ахова працы. – 2001. – № 6. – С. 28–29.

Получено 18.08.2003 г.

ISBN 985–6550–90–4. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Гомель, 2005

УДК 666.972

В. В. ТУР

Брестский государственный технический университет

ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА В XXI ВЕКЕ

Представлен обзор современных технологий производства цементного бетона как наиболее перспективного строительного материала XXI века.

В XXI веке бетон по-прежнему остается одним из наиболее перспективных строительных материалов. Как следует из анализа, представленного в [1], во многих странах мира применение бетона примерно в десять раз превосходит использование строительных сталей. При этом среднегодовое потребление бетона в мире составляет около 0,5 м³ на душу населения. Человечество в своей повседневной деятельности не потребляет ни одного другого материала в таких количествах, за исключением воды. Почему же бетон является столь широко применяемым материалом?

Можно выделить несколько причин, главными из которых, на наш взгляд, являются:

- 1) бетон – универсальный строительный материал;

2) существует возможность рационального объединения в одном конструктивном решении бетона и стали, взаимно дополняющих друг друга; такой композитный материал традиционно принято обозначать термином «железобетон»;

3) применение бетона обеспечивает творческую свободу в создании различных архитектурных форм и размеров конструкции;

4) применение бетона удобно с точки зрения ведения строительных работ при относительно невысокой их стоимости;

5) бетон в отличие от дерева и большинства традиционных сталей обладает стойкостью по отношению к воздействию воды.

Прогресс в технологии бетона. Прогресс в получении новых видов бетонов долгое время отождествляли, главным образом, с их более высокой прочностью на сжатие. Термин «бетон высокой прочности» (или «высокопрочный бетон») ранее использовали применительно к бетонам классов В30...В50, соответствующих в современных строительных нормах [2, 3] классам $C^{25}/_{30}$... $C^{40}/_{50}$ и характеризующих бетоны нормальной прочности. В настоящее время практически во всех европейских нормах проектирования железобетонных конструкций, включая и СНБ 5.03.01–02, прочность бетона на сжатие по-прежнему остается основной классификационной характеристикой. Вместе с тем, все большее внимание помимо прочности уделяется и другим важным конструктивно-технологическим характеристикам свойств бетонов (включая показатели, обеспечивающие долговечность бетона).

Выражением нового взгляда на свойства бетонов является изменение применяемой терминологии. Так, взамен термина «высокопрочный бетон» (англ. High-Strength Concrete – HSC) повсеместно в технической литературе стали применять термины «высококачественный бетон» (англ. High-Performance Concrete – HPC) или «бетон высокой функциональности». Вместе с тем, достаточно часто используют комбинированное сокращение HSC/HPC. Дискуссия о правомерном применении одного либо другого термина, как и о критериях, которым должны отвечать эти бетоны, продолжается специалистами до настоящего времени.

В соответствии с требованиями европейских норм [2, 3] к высокопрочным бетонам относят бетоны, имеющие гарантированную прочность на сжатие более $f_{c,cube}^G = 60 \text{ Н/мм}^2$ ($f_{ck} = 50 \text{ Н/мм}^2$), приготовленные по традиционным технологиям на портландцементном вяжущем, качественных заполнителях при использовании ультрадисперсных минеральных добавок и эффективных суперпластификаторов.

Американские нормы [5] устанавливают нижний предел гарантированной прочности при сжатии для высококачественных бетонов равным нормативному сопротивлению $f_{ck} = 55 \text{ Н/мм}^2$. В японских нормах [6] выделено три группы бетонов, исходя из значения их нормативного сопротивления f_{ck} : обычные (рядовые) конструкционные бетоны ($f_{ck} = 18...36 \text{ Н/мм}^2$); высокопрочные бетоны «1» ($f_{ck} = 36...60 \text{ Н/мм}^2$); высокопрочные бетоны «2» ($f_{ck} > 60 \text{ Н/мм}^2$). Канадские нормы [5] используют другую классификацию, согласно которой установлено пять классов высококачественных бетонов в зависимости от величины их средней прочности на сжатие f_{cm} (таблица 1).

Т а б л и ц а 1 – Классификация высококачественных бетонов

Средняя прочность f_{cm} , Н/мм ²	50	75	100	125	150
Класс	I	II	III	IV	V

В последнее время высококачественные бетоны подверглись дальнейшему делению на классификационные группы, среди которых выделяют **очень высококачественные бетоны** (англ. Very High-Performance Concrete – VHPC) и **ультравысококачественные бетоны** (англ. Ultra High-Performance Concrete – UHPC). Это материалы, получаемые, главным образом, по специальным технологиям и применяемые на практике пока в очень ограниченных объемах.

Очень высококачественный бетон – это бетон, получаемый в условиях строительства из компонентов исключительно высокого качества, но по традиционным технологиям с использованием

портландцементного вяжущего. Различные источники приводят граничные значения гарантированной прочности таких бетонов при сжатии от 100 до 150 Н/мм².

Несмотря на достигнутую высокую прочность на сжатие, высококачественный бетон по-прежнему остается искусственным камнем, показывающим относительно низкую прочность на растяжение. Кроме того, высококачественным бетонам свойственно хрупкое разрушение (практически полное отсутствие нисходящей ветви на диаграмме деформирования), что требует применения более высоких значений коэффициентов безопасности по материалу при расчетах железобетонных конструкций. Высококачественные бетоны имеют повышенные значения деформаций усадки (главным образом аутогенной усадки) и ползучести.

В силу названных обстоятельств, основные направления исследований по совершенствованию высококачественных бетонов связаны с повышением их прочности на растяжение и деформативность, т. е. исключения или снижения влияния факторов, приводящих к хрупкому разрушению структуры материала.

Ультравысококачественный бетон относится к последнему поколению материалов на основе портландцемента. Термин «ультравысококачественный бетон» был впервые использован американскими и французскими исследователями. Составы таких бетонов существенно отличаются от традиционных, и, как правило, данный материал невозможно получить без применения мелкодисперсного армирования структуры. Условно принято, что УНРС – это бетоны, показывающие прочность при сжатии более 150 МПа. Очевидно, что эта группа бетонов в дальнейшем подвергнется еще более детальной классификации по мере развития их технологий, так как в различных вариантах производства существенно отличаются как составы, так и способы их получения.

В современных публикациях, посвященных УНРС, выделяют три группы таких материалов:

1 Бетоны, получаемые с использованием реакционно-способных порошкообразных добавок высокой дисперсности (согласно термину, введенному специалистами французского концерна *Bouygues* – «*Béton de Poudres Réactive*»). В базовом варианте без применения мелкодисперсного армирования такие бетоны способны показывать прочность при сжатии до 300 МПа, тогда как при использовании мелкодисперсного микроармирования стальными волокнами и применении автоклавной обработки – до 810 МПа.

2 Уплотненный армоцементный композит (*CRC – Compact Reinforced Composite*), известный под коммерческим названием *COMPRESIT*, получен скандинавскими исследователями (фирма *Alborg Portland*, Дания). Сущность получения этого материала заключена в применении большого содержания стальных микроволокон (от 5 до 15 % объема структуры), мелкозернистых высококачественных заполнителей, дополнительных технологических операций.

3 Композит *SIFCON* является объединением концепции армоцемента и микродисперсного армирования (англ. *Slurry Infiltrated Fibred Concrete*). В разработанном решении основа, представляющая собой каркас из арматурных стальных сеток, заполняется стальными микроволокнами, а затем под давлением нагнетается мелкозернистый бетон. Вариантом этой концепции является композит *SIMCON* (англ. *Slurry Infiltrate Mat Concrete*), в котором вместо арматурных сеток используют маты из стальных микроволокон, произвольно ориентированных в пространстве.

Все перечисленные бетоны нового поколения имеют общие отличительные признаки:

- 1) низкое водовяжущее отношение;
- 2) большое содержание микрокремнезема (*silica fume*) или других ультрадисперсных активных минеральных добавок;
- 3) ограничение крупности заполнителя; как правило, используются мелкозернистые бетоны, где в качестве заполнителя применяют высококачественные пески;
- 4) большое содержание высококачественных пластифицирующих добавок в сочетании с агентами, повышающими вязкость жидкости.

Сравнение основных свойств традиционных и высококачественных бетонов представлено в таблице 2.

Т а б л и ц а 2 – Сравнение некоторых свойств традиционных бетонов и бетонов нового поколения

Основные свойства	Обычный бетон	Высококачественный бетон (HPC)	Ультравысококачественный бетон (UHPC)
Прочность на сжатие, МПа	< 50	≈ 100	≈ 200
Модуль упругости в зависимости от вида заполнителей, ГПа	25–35	40–50	50–80
Водовяжущее отношение	≥ 0,40	≈ 0,30	< 0,20
Химическая добавка	Необязательна	Пластификатор или суперпластификатор	Суперпластификатор высокого качества (гиперпластификатор)
Высокодисперсная минеральная добавка	Необязательна	Микрокремнезем (silica fume), зола-унос	Микрокремнезем, микронаполнители
Дисперсное армирование	Полезно, но необязательно	Полезно	Необходимо
Уход	Традиционный	Традиционный	Тепловая обработка при повышенном давлении
Коэффициент истираемости	4,0	2,8	1,3
Глубина карбонизации, мм	10	2	0
Диффузия хлор-ионов, $\cdot 10^{-12}$ м ² /с	1,1	0,6	0,02

Кроме перечисленных выше в настоящее время интенсивно развиваются технологии получения самоуплотняющихся высококачественных бетонов (англ. Self-Compacting HSC), основным классификационным признаком которых является исходная подвижность бетонной смеси, а не показатель прочности.

Самоуплотняющиеся бетоны (SCC) впервые были предложены в начале девяностых годов в Японии [7] и получили развитие в рамках ряда исследовательских проектов в Европе. Помимо Японии, самоуплотняющиеся бетоны успешно применяются во Франции, Дании, Великобритании, Голландии, Индии, Германии. Технология самоуплотняющихся бетонов продолжает совершенствоваться до настоящего времени и основывается на применении композиций портландцементного вяжущего, традиционных заполнителей и мелкодисперсных добавок в рационально подобранных пропорциях агента, модифицирующего вязкость жидкой фазы, и совместимого с ним суперпластификатора.

Самоуплотняющиеся высококачественные смеси должны обладать следующими свойствами:

- 1) способность к самонивелированию (самовыравниванию) и уплотнению под действием собственного веса без дополнительного вибрационного воздействия;
- 2) способность к полному воздухоотделению в момент укладки и растекания;
- 3) способность к плотному и равномерному заполнению опалубки сложной конфигурации, насыщенной армированием;
- 4) способность к сохранению необходимой удобоукладываемости в течение требуемого интервала времени.

Обладая большой подвижностью, самоуплотняющиеся бетоны позволяют получать конструкции, имеющие высокие показатели качества без использования вибрационного уплотнения. Особенно эффективно их применение в конструкциях, насыщенных стержневой арматурой и имеющих сложную форму.

При проектировании состава самоуплотняющейся бетонной смеси используют «правило тройной пропорции», сформулированное в рекомендациях Okamura и Ozawa [7] (рисунок 1):

- содержание крупного заполнителя не должно превышать 50 % объема твердой фазы;
- объемное содержание мелкого заполнителя (песка) в растворной части не должно превышать 40 %;
- объемное соотношение воды и мелкодисперсного наполнителя должно составлять от 0,9 до 1,0 в зависимости от свойств наполнителя;
- содержание воды и дозировка суперпластификатора назначается из условия достижения требуемого самоуплотнения бетонной смеси.

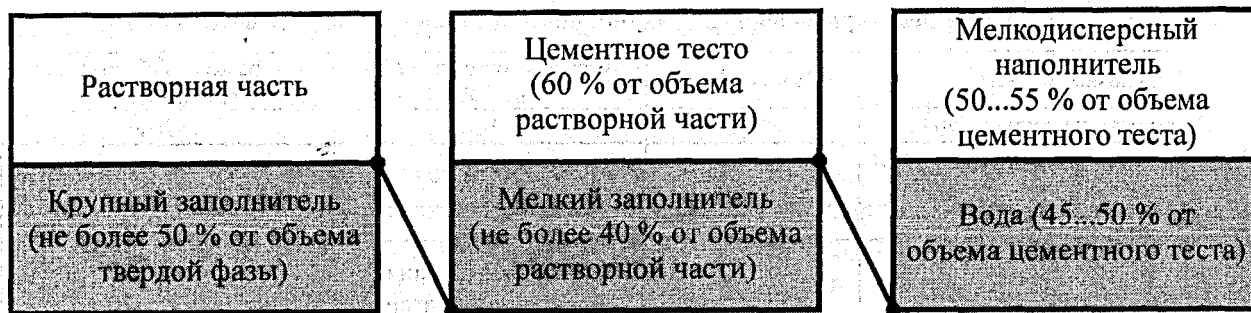


Рисунок 1 – Пропорции составляющих самоуплотняющейся бетонной смеси согласно рекомендациям Okamura и Ozawa [7]

Как следует из результатов исследований, приведенных в работе [7], рекомендованные пропорции могут подвергаться корректировке в зависимости от формы и гранулометрического состава заполнителей, вида мелкодисперсного наполнителя, требуемых показателей прочности. На рисунке 2 представлены рекомендуемые объемные соотношения компонентов самоуплотняющихся смесей, предложенных немецкими исследователями: Holschemacher K. [8], Ludwig H. M., Weise F. и др. [9].

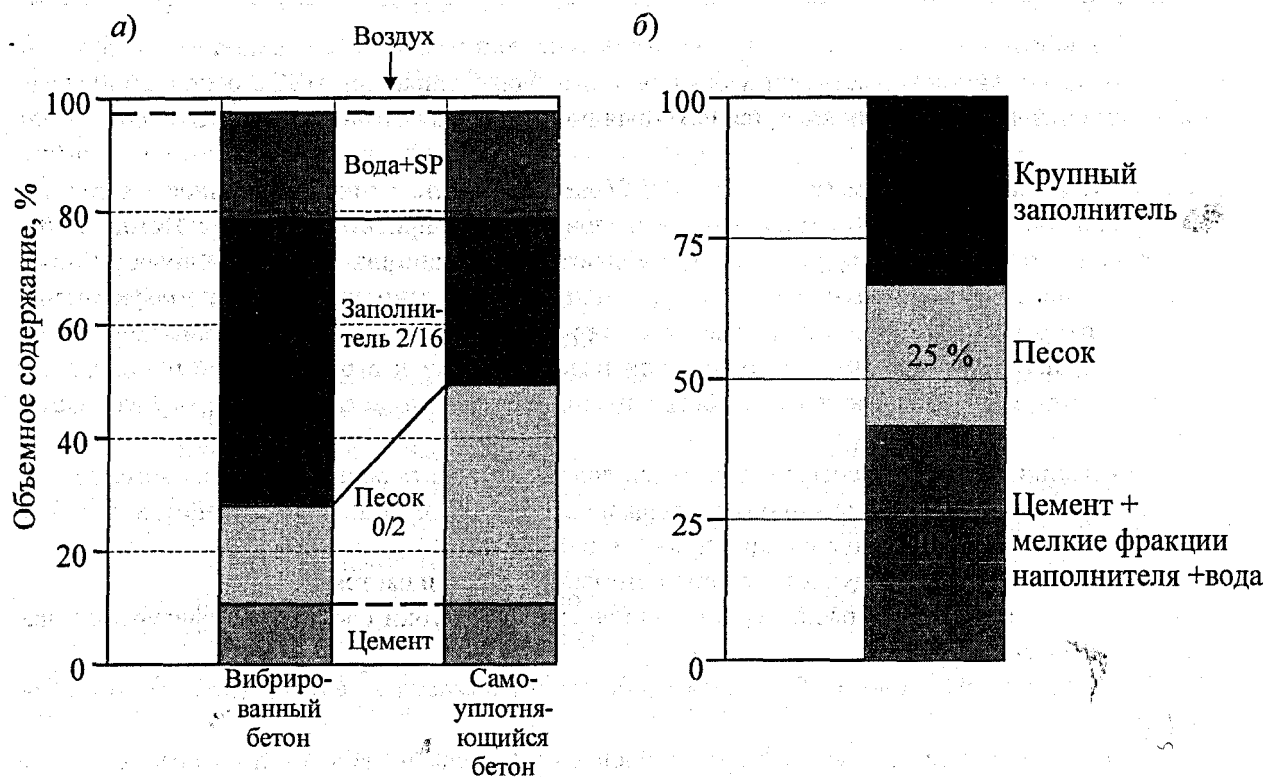


Рисунок 2 – Примерное объемное содержание компонентов самоуплотняющихся бетонов по данным немецких исследователей: а – Holschemacher K.; б – Ludwig H. M., Weise F. и др.

Очевидно, что для обеспечения сформулированных ранее требований необходимо изменить подходы к проектированию состава бетонной смеси. При решении этой задачи специалисты сталкиваются с двумя базовыми влияниями, дающими противоположные эффекты. С одной стороны это необходимость введения специальных добавок-модификаторов вязкости цементного теста, препятствующих сегрегации и осадению заполнителя, с другой – добавки, противодействующие сегрегации (агенты, модифицирующие вязкость жидкости), могут вызвать увеличение пористости за счет дополнительного объема вовлеченного воздуха. Это нарушает требование обеспечения плотной структуры и вызывает необходимость тщательного подбора названных модификаторов. Для исключения сегрегации смеси в самоуплотняющихся бетонах прибегают к применению мелко- и

ультрадисперсных наполнителей с максимальной фракцией не более 0,125 мм [10]. В качестве таких наполнителей используют золу-унос, конденсированный микрокремнезем, метакаолины и т.д. Мелкодисперсные фракции вместе с оптимальным количеством воды и суперпластификатора повышают вязкость смеси. Чтобы крупный заполнитель не затруднял процесса растекания бетона, содержание теста из пылевидных фракций должно быть большим, чем 35 %. Содержание мелкодисперсных (пылевидных) фракций в воде является различным в зависимости от требуемых свойств затвердевшего бетона, например для НРС С115 $W/S \leq 0,3$, обычных $W/S \leq 0,6$ [10]. Однако основным компонентом, обеспечивающим требуемую подвижность, является эффективный пластификатор, который в последнее время принято обозначать термином «гиперпластификатор».

Пластификаторы. Как было показано ранее, современная технология цементных бетонов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных свойств, базируется на рациональном подборе их составов, включая использование мелко- и ультрадисперсных минеральных добавок в сочетании с эффективными суперпластификаторами [11, 15–17, 26]. Применение пластифицирующих добавок позволяет достичь требуемой удобоукладываемости бетонной смеси, имеющей низкое водовязующее отношение (как правило, не более 0,35).

Добавки-пластификаторы на той или иной стадии гидратации вяжущего и образования цементного камня воздействуют на механизм зародышеобразования и роста гидратных структур, физическую микроструктуру цементных систем, их физико-химические и эксплуатационные свойства.

Примерная классификация наиболее широко применяемых пластифицирующих добавок и их сочетаний в многокомпонентных комплексных добавках показана на рисунке 3.

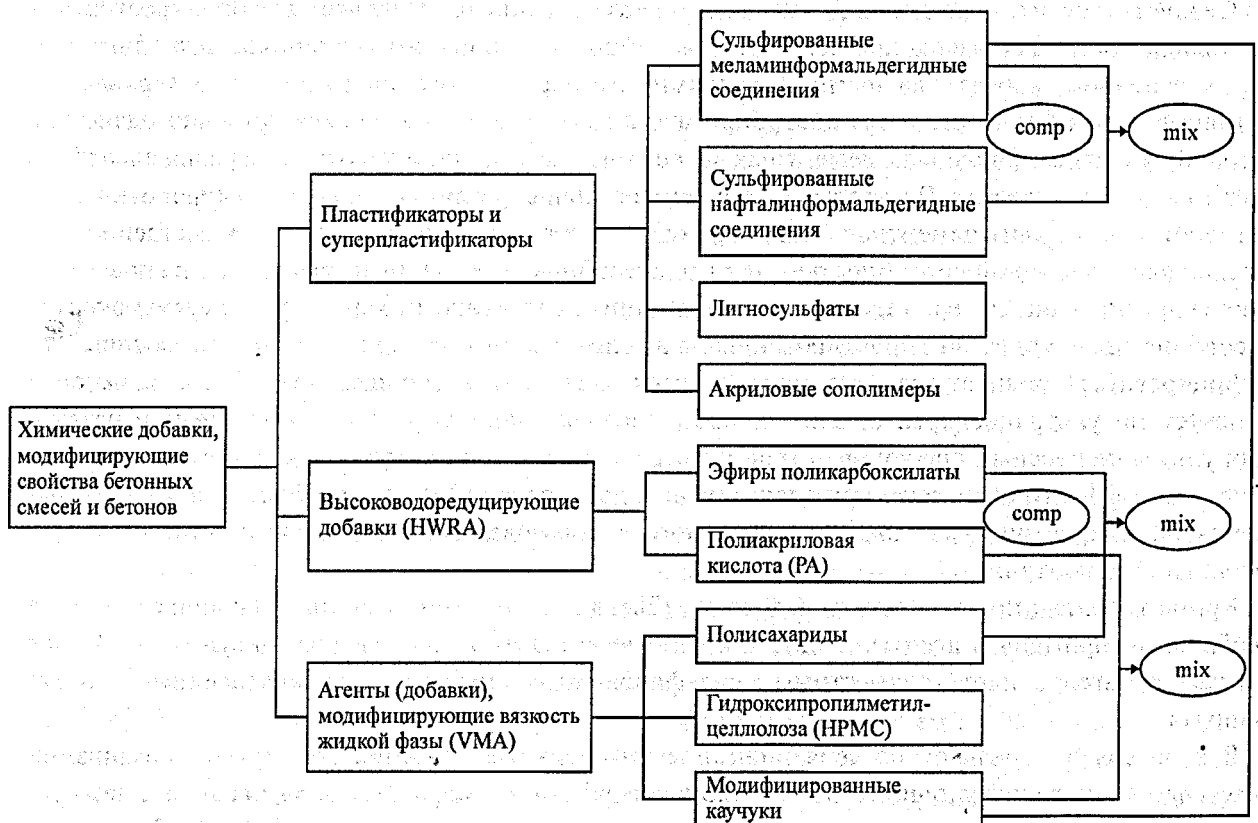


Рисунок 3 – Классификация химических добавок

Как показывает анализ большинства из широко распространенных зарубежных пластификаторов [15, 16], практически все пластифицирующие добавки стран СНГ [11], применяемые в производстве бетонов высокой прочности, получают, главным образом, на основе следующих классов соединений:

1 Сульфированные меламинформальдегидные соединения (олигомеры) и комплексы на их основе. Для модификации структуры меламинформальдегидного олигомера с целью придания пластифицирующих свойств часто используют натриевую соль *p*-аминобензосульфокислоты.

2 Сульфированные нафталинформальдегидные соединения (олигомеры) и комплексы на их основе, как, например, олигомеры и полимеры на основе формальдегида и натриевой соли β -нафталин-сульфокислоты.

3 Модифицированные (рафинированные и практически не содержащие сахаров) лигносульфонаты или соли лигносульфоновых кислот. В пределах каждой группы могут быть получены соединения с различным олигомерным составом и соотношением компонентов, что существенно влияет на их пластифицирующий эффект.

Следует отметить, что олигомеры и полимеры, входящие в состав пластифицирующих добавок, производимых в странах СНГ (С-3, «Дофен», МФ-АР, НТКС, «Универсал П-2» и др.), имеют довольно широкий диапазон молекулярной массы и, кроме того, включают в свой состав свободные соли сульфокислот, сульфаты натрия. Это в определенной степени экранирует пластифицирующий эффект, определяет нестабильность показателей добавок во времени и в зависимости от условий применения.

По своей природе приведенные добавки и классы соединений являются анионными поверхностно-активными веществами. Соответственно, механизм их действия, в целом, однотипен и сводится к адсорбции как физической, так и химической в зависимости от вида адсорбата, на гидратированных поверхностях зерен цементных систем.

Следует отметить, что данный механизм пластификации не позволяет достичь требуемой в настоящее время для высокопрочных бетонов однородности цементных систем. Это объясняется, в основном, двумя главными факторами. Во-первых, установлено, что поверхностно-активные пластификаторы могут адсорбироваться только на образующихся при взаимодействии с водой гидратных оболочках цементных зерен, тогда как на клинкерных минералах адсорбция практически отсутствует. Во-вторых, и это самое главное, различные по своей гидrolитической активности минералы цементного клинкера образуют гидратные оболочки с существенно различной адсорбционной способностью, так что адсорбция молекул пластификатора на поверхностях гидратированных зерен имеет ярко выраженный селективный характер. В первую очередь адсорбция происходит на гидратированных алюминатных фазах, при этом не успевающие модифицироваться силикатные фазы укрупняются. Ситуация становится еще более сложной в присутствии ультрадисперсных минеральных добавок. Например, при использовании некоторых ультрадисперсных шлаков действие пластификаторов поверхностно-активного типа становится малоэффективным даже при значительных дозировках [26]. Это особенно пагубно сказывается на микроструктуре бетона, получаемого с использованием высокоалюминатных (расширяющихся) цементов.

Кроме того, как показывают исследования [28], для получения самоуплотняющихся бетонов необходимо применять агенты, модифицирующие вязкость жидкости (см. рисунок 3). В ряде случаев эти агенты плохо совместимы с сульфированными нафталинформальдегидными соединениями.

В этой связи обращают на себя внимание интенсивные исследования других механизмов пластификации, заключающихся не столько в адсорбции на гидратных образованиях и дезагрегации частиц цемента, сколько в изменении растворимости зерен цемента [13, 16, 17, 25].

Так, например, исследованиями [17] было установлено, что в присутствии 1 % сахарозы в воде затворения наблюдаются сильно замедленное зародышеобразование и рост твердой фазы. Предположительно, в таких системах не происходит образование кристаллогидратов, в результате чего в поровом пространстве во много раз (до 1000 раз) возрастает концентрация силикатных ионов, в то время как ионов кальция – до десятков раз по сравнению с обычным твердением цемента. Как было установлено, образующийся при растворении в поровой воде кальцийсо-

держашей компоненты катион CaOH^+ присоединяется модифицированными компонентами молекулы сахарозы, а именно: глюкозой и фруктозой, образуя комплекс GF- CaOH^+ . Этот комплекс является мощным ингибитором зародышеобразования как $\text{Ca}(\text{OH})_2$, так и гидратов силикатов кальция ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). В результате в поровой воде образуется раствор с высоким содержанием как ионов кальция, так и силикатных ионов. В случае «выключения» ингибирующего эффекта на определенном этапе пространство между цементными зернами заполняется однородной беспористой гидратированной структурой. Таким образом, в работах [12, 13] был сделан вывод о необходимости поиска веществ, способных связывать катион CaOH^+ , предотвращая образование гидратированных силикатов кальция и гидроксида кальция. Как показали исследования [12, 13], полиакриловая кислота (ПАК) является одним из таких материалов. Карбоксильные кислотные группы предотвращают или тормозят адсорбцию на поверхностях гидратированных зерен цементного клинкера. Ионы кальция, переходящие в поровую воду при растворении, скорее всего находящиеся там в виде катиона CaOH^+ , связываются анионными карбоксильными группами полиакриловой кислоты, предотвращая образование $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и гидратов силикатов кальция на поверхности цементных зерен. В результате в поровой воде повышается концентрация ионов Ca^{+2} , OH^- и силикатных анионов $\text{Si}(\text{OH})_2\text{O}_2^{-2}$, $\text{Si}(\text{OH})\text{O}_3^{-3}$. Более того, образующийся комплекс ПАК – CaOH^+ может служить связующим для силикатных и кальциевых ионов, способствуя формированию более однородной микроструктуры бетонов. В целом, эффект заключается в том, что CaO и SiO_2 из цементной фазы вначале растворяются в поровой воде и равномерно распределяются в пространстве между зернами цементной системы. В качестве материала, «выключающего» торможение образования твердой фазы в присутствии полиакриловой кислоты, в работах [12, 13] предлагается использовать метаколин (например, MetaStar 501). В такой системе твердение происходит при достаточно низком водо-цементном отношении, образование гидратных форм силиката кальция происходит не только вблизи зерен цемента, но и во всем пространстве между цементными зернами, снижая микроскопическую пористость образующегося цементного камня. Кроме того, при использовании пластификаторов данного типа появляется возможность сформировать транзитную зону высокого качества [25]. Подобный механизм действия имеют и широко распространенные суперпластификаторы на основе соединений поликарбоксилатного типа.

Одной из главных проблем, возникающих при производстве конструкций из высокопрочных (или высококачественных) бетонов, имеющих низкое водовязущее отношение, является так называемая аутогенная усадка, приводящая к образованию микротрещин в структуре бетона в раннем возрасте. В последнее время изучению аутогенной усадки посвящено достаточно большое количество аналитических и экспериментальных исследовательских работ [18–21]. Выявлено, что при снижении водовязущего отношения и введении в цементную систему ультрадисперсных минеральных добавок, например, микрокремнезема (*silica fume*), аутогенная усадка существенно возрастает. По данным работы [21], влияние типа пластификатора и его количества сказывается на величине деформаций аутогенной усадки цементов различного химико-минералогического состава и выражается двояко: а) воздействием на механизм гидратации [26]; б) снижением кинетики набора прочности бетона (в раннем возрасте) и соответственно повышением его деформативности [6]. В качестве примера на рисунке 4 приведены графики развития во времени деформаций свободной аутогенной усадки цементного камня при изменении водовязущего отношения (при варьировании дозировки суперпластификатора класса сульфированных нафталинформальдегидных соединений) и введении микрокремнезема (SF), позаимствованные из работы [19]. Как видно из представленных графиков (см. рисунок 4), повышенная дозировка суперпластификатора в сочетании с добавкой SF (при постоянном водовязущем отношении) приводят к существенному возрастанию деформаций свободной аутогенной усадки.

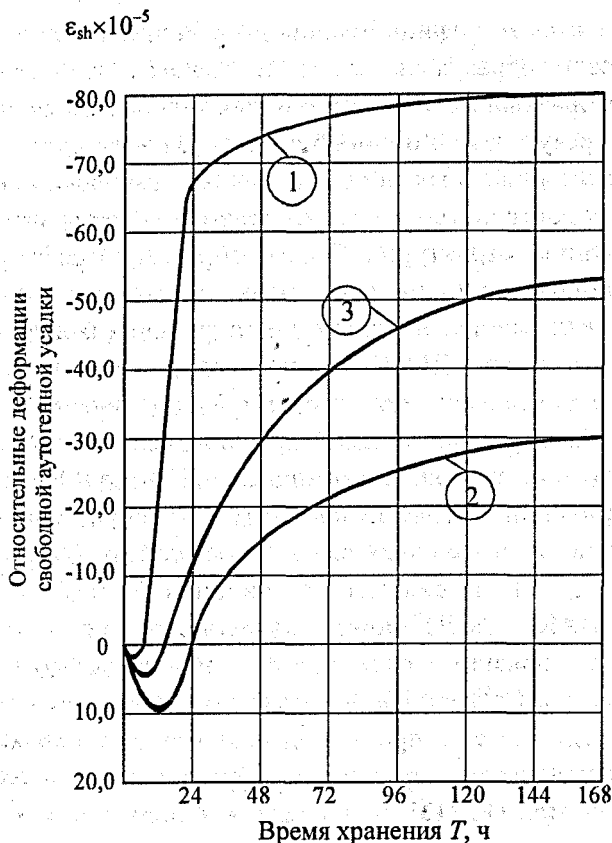


Рисунок 4 – Развитие во времени относительных деформаций свободной аутогенной усадки: 1 – SF = 0, SP = 2 %, в/в = 0,25; 2 – SF = 0, SP = 0,5 %, в/в = 0,33, 3 – SF = 10 %; SP = 0,5 %; в/в = 0,33

Как видно из графиков, показанных на рисунке 5, применение пластификатора типа С (SPC) позволило существенно снизить величину относительных деформаций свободной усадки даже при достаточно низких водовяжущих отношениях. При этом прочность на сжатие бетона образцов в возрасте 28 суток, изготовленных с SPC, оказалась несколько большей по сравнению с прочностью образцов, полученных с SPA и SPB (см. рисунок 2, б). К сожалению, в исследованиях [27] не представлен анализ причин наблюдаемого эффекта снижения деформаций аутогенной усадки.

Вяжущие. Для снижения деформаций аутогенной усадки в последнее время предложено использовать взамен части портландцемента добавку метакаолинов [14, 24], сульфоалюминатные и ферроалюминатные комплексы в сочетании как с алитовыми, так и белитовыми цементами [22, 23]. При этом наиболее широкое развитие получают белитовые цементы, дополненные сульфоалюминатными добавками [22]. Как показывают исследования [22–24], применение названных добавок в оптимальных количествах позволяет не только компенсировать деформации аутогенной усадки, но и получить расширение композитной системы даже в изолированном состоянии. Согласно определению [29] расширяющийся цемент (expansive cement) – это цемент, при затворении которого водой образуется цементное тесто, существенно увеличивающее свой начальный объем в период схватывания и твердения. Различают следующие типы расширяющихся цементов в зависимости от их вещественного состава и рецептуры:

1 Расширяющийся цемент типа К (Клейна) (expansive cement, type K), являющийся смесью портландцемента и расширяющегося комплекса, составленного из $C_4A_3\bar{S}$, свободного гипса и свободной извести. Сульфоалюминатный клинкер получают при совместном обжиге при $T = 1380$ °С южноамериканских бокситов, гипса и карбоната кальция в примерном соотношении 20 : 30 : 50.

Учитывая то обстоятельство, что аутогенные изменения объема являются внешним проявлением эффекта самовысушивания при химической усадке, после того как начинает формироваться жесткий каркас, следует ожидать, что изменение механизма пластификации повлияет на величину относительных деформаций свободной аутогенной усадки.

Влияние типа пластификатора на величину деформаций свободной аутогенной усадки можно проследить по результатам исследований высокопрочных бетонов (с водовяжущим отношением 0,24...0,29), приведенных в работе [27]. Бетонные смеси приготавливали на цементах классов CEM I 42,5R и CEM I 52,5R с использованием микрокремнезема (SF) в количестве 6,75 % и трех типов пластификаторов: 1) тип А – смесь на базе сульфированных нафталиноформальдегидных и металиноформальдегидных соединений (SPA); 2) тип В – на базе сульфированных нафталиноформальдегидных соединений (SPB); 3) типа С – на базе поликарбоксилатных соединений (SPC). Как было показано выше, пластификатор типа С имеет отличный механизм действия от пластификаторов типа А и В.

2 Расширяющийся цемент типа М (проф. В.В. Михалова) (expansive cement, type M), являющийся смесью портландцемента (или портландцементного клинкера), глиноземистого цемента (или портландцементного клинкера), глиноземистого цемента и гипса. Составы цементов типа М подбирают таким образом, чтобы в бетоне на их основе в результате связанного расширения были достигнуты дополнительные сжимающие напряжения (самонапряжение).

3 Расширяющийся цемент типа S (expansive cement, type S), являющийся по существу разновидностью портландцемента с повышенным содержанием C_3A и гипса.

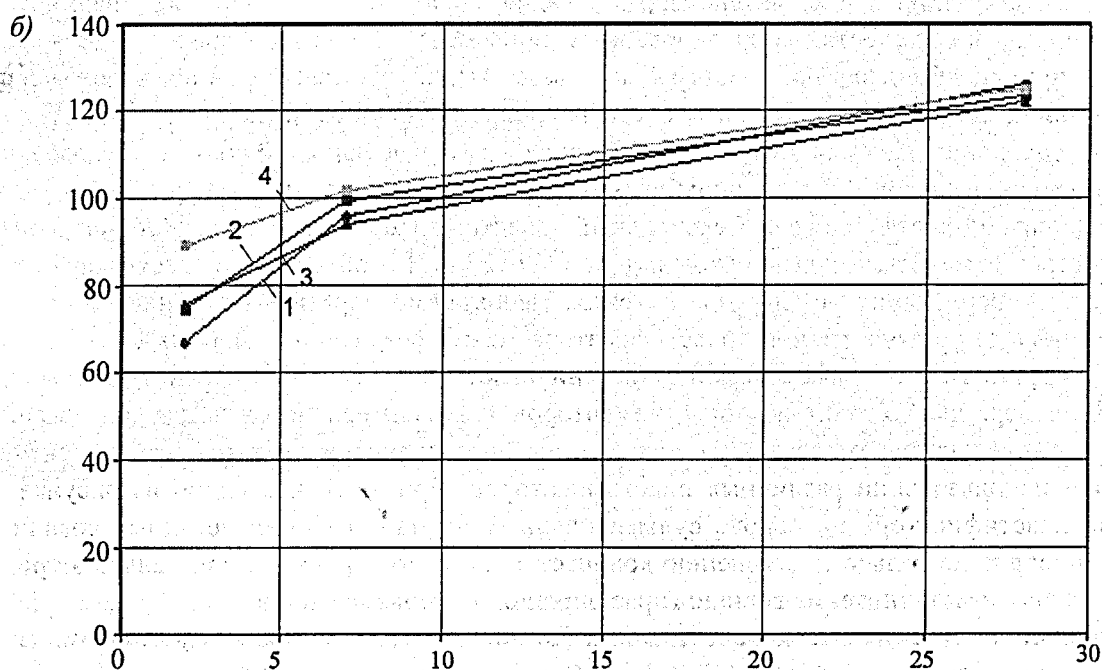
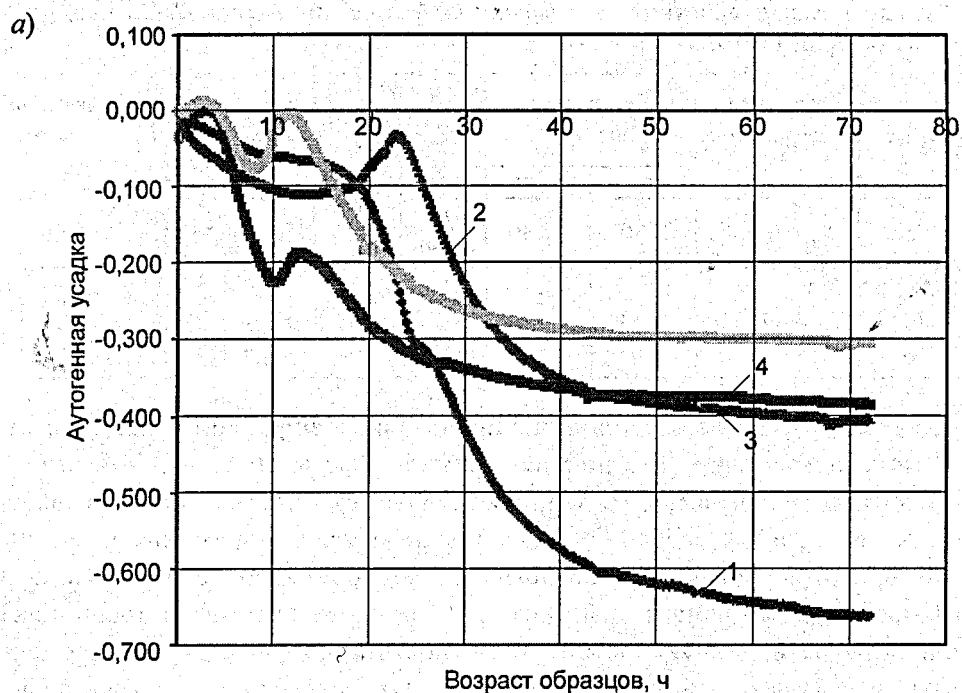


Рисунок 5 — Изменение во времени деформаций свободной автогенной усадки (а) и прочности на сжатие (б) бетонов, приготовленных с использованием различных типов пластификаторов: 1 — 6 % SPA + 2 % SPB, $w/v = 0,24$; 2 — 4 % SPC; $w/v = 0,24$; 3 — 6 % SPA + 2 % SPB; $w/v = 0,29$; 4 — 4 % SPC; $w/v = 0,29$

В настоящее время разработана еще одна разновидность расширяющихся цементов – сульфоалюминатные (SAC) и ферроалюминатные (FAC) белитовые цементы. Наибольшие объемы таких цементов (до 1 млн т/г) производятся в Китае. Применение модифицированных белитовых цементов взамен традиционных алитовых цементов позволяет решить как энергетическую (более низкая температура обжига), так и экологическую (уменьшить выброс CO_2) проблемы.

В таблице 3 приведены основные характеристики белитовых сульфоалюминатных и ферроалюминатных цементов, производимых в Китае.

Т а б л и ц а 3 – Основные характеристики белитовых сульфоалюминатных и ферроалюминатных цементов, производимых в Китае

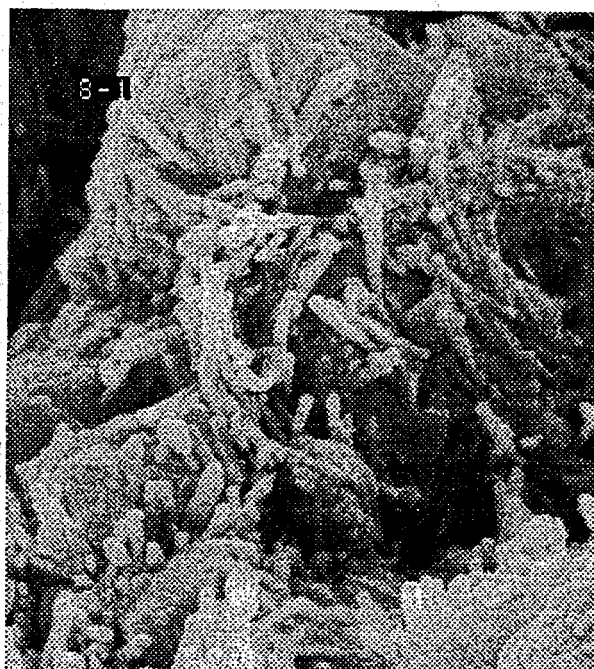
Обозначение	Класс	Удельная поверхность, m^2/kg	Сроки схватывания, мин		Прочность на сжатие (изгиб), МПа, сут		Самонапряжение, МПа, сут		Свободное расширение, %, сут	
			начало	конец	1	28	7	28	1	28
E.SAC/FAC	SE.525	≥ 400	≥ 30	≤ 180	31,4 (4,9)	41,2 (5,9)	Не армируется		$\geq 0,05$	$\leq 0,5$
S.SAC/FAC	30 40 50	≥ 370	≥ 40	≤ 240	42,5		$\geq 2,3$ $\geq 3,1$ $\geq 3,7$	$\leq 4,0$ $\leq 5,0$ $\leq 6,0$	–	$\leq 1,75$

Вместе с тем собственные исследования, выполненные с расширяющимися цементами сульфоалюминатного типа, показывают, что широко применяемые в отечественной строительной практике пластификаторы (например, С-3, «Универсал П-2») вызывают, при определенных условиях, снижение характеристик свободного расширения и самонапряжения по сравнению с базовыми смесями, приготовленными при аналогичном водоцементном отношении. Это следует, очевидно, связывать с механизмами действия традиционных пластификаторов поверхностно-активного типа на гидратирующую систему, в частности при повышенном содержании алюминатной составляющей. В названных цементных системах, согласно экспериментальным данным, наблюдается различие в характере формирования адсорбционного слоя пластифицирующего полимера на поверхностях гидратированных силикатных и алюмосодержащих фазах цемента. Так, при адсорбции на алюмосодержащих фазах молекулы полимеров образуют малую посадочную площадку и, как следствие, «толстый» адсорбционный слой (порядка 10000 Å), тогда как при адсорбции на силикатной составляющей размер посадочной площадки довольно большой (порядка десятков Å), а толщина слоя органических молекул в 1000 раз меньше, чем вокруг алюминатной составляющей. Селективный характер адсорбции поверхностно-активных пластификаторов отмечается целым рядом авторов [11, 22, 23] и объясняет существующие неоднородности в твердеющих цементных системах. Необходимо обратить внимание на то, что применение поверхностно-активного пластификатора может создать условия для образования «позднего» этtringита. Все вышесказанное ограничивает до известной степени пределы использования поверхностно-активных пластификаторов в цементных бетонах для достижения требуемых технических параметров. На рисунке 6 показана модификация структуры цементного камня при использовании различных пластификаторов. При этом, как видно из рисунка 6, применение пластификатора на основе сульфированных нафталинформальдегидных соединений (С-3) приводит не только к изменению количества, но и модификации кристаллов этtringита, что обуславливает снижение величины расширения и самонапряжения.

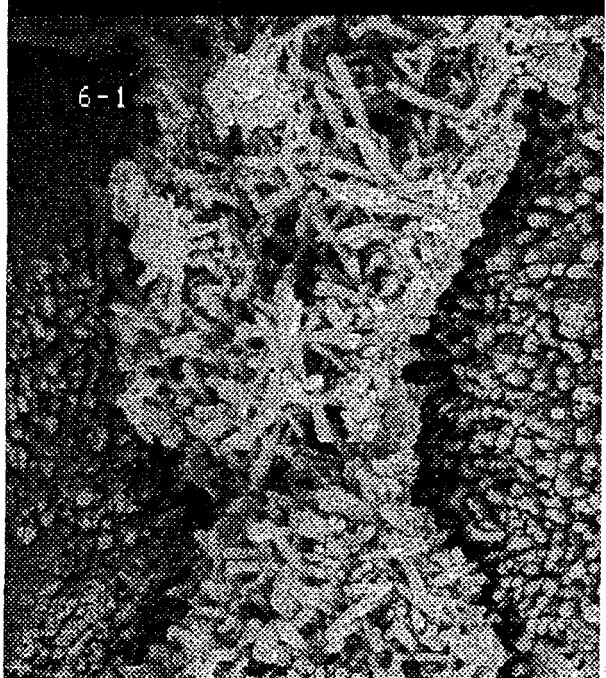
Как видно, для получения высококачественных бетонов необходимо решить целый комплекс специальных задач как научного, так и практического характера.



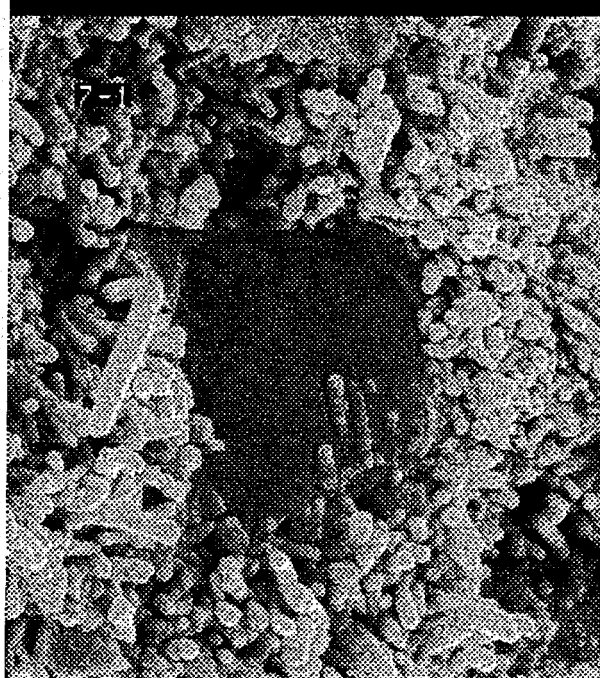
204874 20KV x15.0k 2.00um



204812 20KV x15.0k 2.00um



204891 20KV x10.0k 3.00um



204898 20KV x15.0k 2.00um

Рисунок 6 – Модификация микроструктуры цементного камня при использовании различных пластификаторов

Например, можно сформулировать только некоторые из вопросов, возникающих при совершенствовании высококачественных бетонов, приведенных в [30] и относящихся к цементу:

- 1 Какой из всех доступных цементов наиболее предпочтителен для использования в НРС?
- 2 Какие характеристики должен иметь цемент (гранулометрический, фазовый состав) для конкретного НРС?
- 3 Каковы оптимальные размеры и форма частиц цемента, как они должны быть распределены по фазовому составу?

4) Каково оптимальное содержание, гранулометрический состав мелко- и ультрадисперсных добавок (SF, FA и др)?

5) Какова взаимосвязь между фазовыми превращениями и долговечностью бетона?

Перечень невыясненных вопросов мог бы быть значительно большим. Учитывая многообразие факторов, влияющих на достижение конечного результата, экспериментальное решение проблемы является достаточно трудоемким и экономически затратным. Необходимо отметить, что к концу XX века наука о бетоне и технологии его получения опиралась, главным образом, на логические выводы из результатов эмпирических исследований. К началу XXI века накопление базы данных о свойствах цементных бетонов и их компонентов, развитие компьютерных технологий позволяет говорить о возможности прогнозирования анализа свойств бетона, который еще не произведен («виртуального бетона»).

Виртуальный бетон и виртуальные технологии. По мнению многих специалистов [30], в XXI веке будет наблюдаться интенсивный рост практического использования компьютерных баз данных, включая и накопленные данные в области цемента и цементного бетона. Изменяются и материаловедческие аспекты баз знаний в строительстве. Как следует из рисунка 7, а, цикл строительства представлен внешним кольцом, в то время как внутренняя область и ее содержание представляют собой знание о материалах, используемых в строительном цикле. В работе [30] отмечается, что к концу XX века знание о материалах представлено в форме связанных, но не очень прочно соединенных слагаемых, показанных во внутренней окружности. К нему относятся: базы данных с результатами исследований, информация в виде научных статей и отчетов, экспертные оценки, отдельные стандарты. Некоторые из них пополняются из лабораторных исследований, некоторые – из практических наблюдений. Стрелки между внешней окружностью и внутренней областью указывают на вероятную взаимосвязь знания с различными фазами строительства.

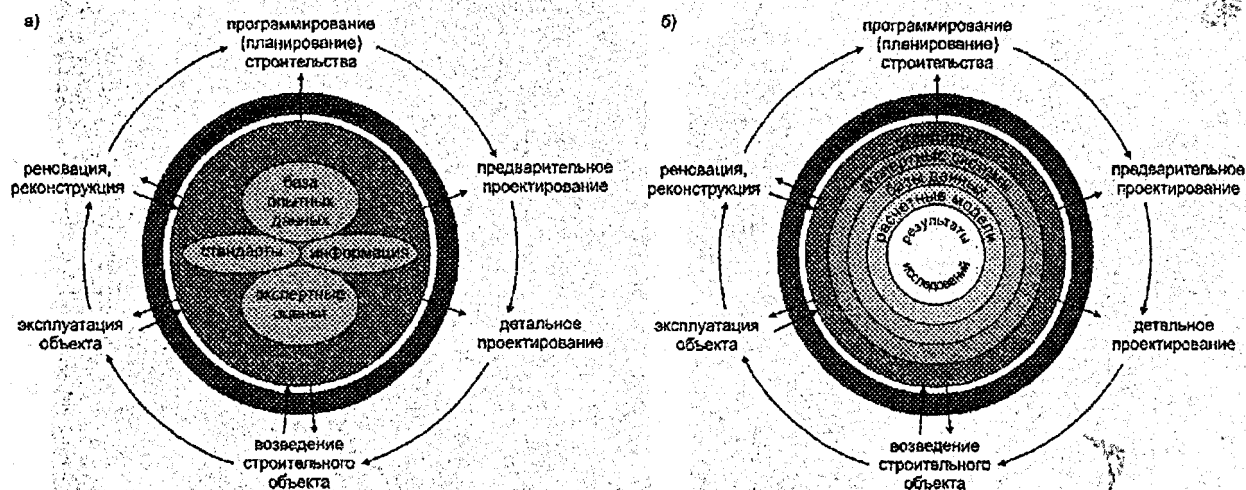


Рисунок 7 – Цикл строительства: а – в конце XX века; б – в начале XXI века

Отдельное кольцо, выделяемое из базы знания о материалах и обозначенное как «строительные нормы», является своеобразным фильтром между наукой и практикой. Рисунок 7, б – это визуализация того, как рисунок 7, а должен быть видоизменен в XXI веке. Знания о материалах во внутренней окружности – это объединенная компьютерная система знаний, показанных концентрированными окружностями. В этом случае все составляющие являются компонентами одной системы и нет реальных преград между ними.

В настоящее время знания в области цемента, бетона, технологий накапливаются при добавлении индивидуальных достижений (так называемых «самородков»). При этом в большинстве случаев на площади, обозначенной как «знание о материалах», индивидуальные «самородки» знаний не объединяются. Тем не менее, когда появляется достаточное количество таких «самородков», выросших на различных, но родственных аспектах предмета, они объединяются и позволяют создать новые перспективные технологии. Предполагается, что к 2005 году из отдельных «самородков» знаний о цементе и бетоне станет возможным создать совершенно новые уникальные технологии [30]. Используя симуляционные компьютерные модели, можно создавать «виртуальные» тех-

нологии, базирующиеся не только на лабораторном эксперименте. Рисунок 8, а показывает традиционный процесс исследования, в котором гипотезы (идея или отдельная теория) проверяются лабораторным экспериментом. При этом в зависимости от результата эксперимента гипотеза подвергается ревизии. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет достигнут приемлемый результат. А иногда теория просто подводится под экспериментальные данные. В соответствии со схемой, показанной на рисунке 8, б, формируется гипотеза, а затем она моделируется математически. Модель подвергается тестированию (верификации) на фоне базы данных, полученных в экспериментах. Продукты процессов все больше представляются в виде компьютерной базы данных, симулирующих системы объединенных знаний. В качестве примера может служить схема исследования цементных систем, реализованная в Национальном институте стандартов и технологий (NIST, США, рисунок 9).

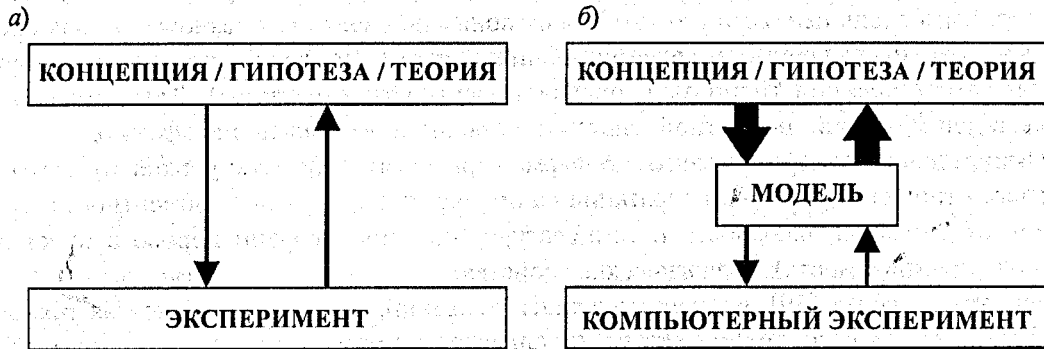


Рисунок 8 – Процесс исследования: а – традиционный; б – компьютерный

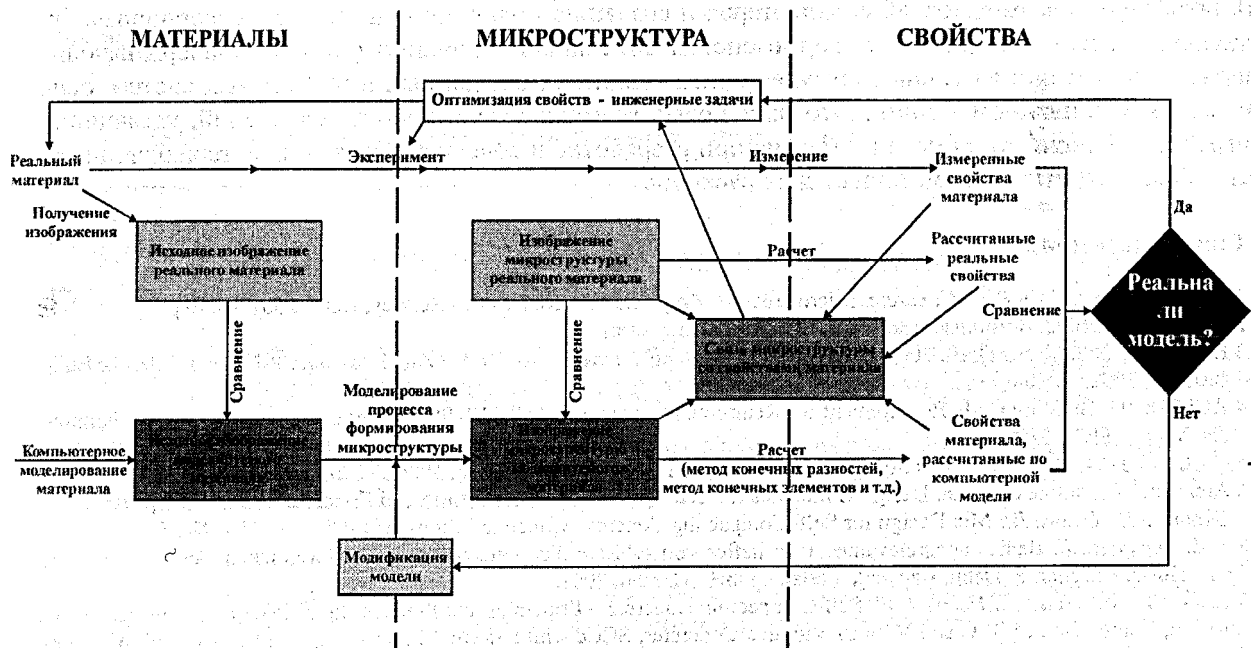


Рисунок 9 – Схема исследования цементных систем

Среди главных факторов (признаков), позволяющих утверждать о реальности создания объединенной системы знаний о цементном бетоне, по утверждению исследователей [30], можно выделить следующие:

- 1) развитие материаловедения и сознание того, что наука о цементе и бетоне является предметом фундаментальных исследований, заслуживает того, чтобы к ней обратились академические ученые;
- 2) осознание возможностей целенаправленного воздействия на комплекс свойств бетона с целью получения материалов нового поколения;
- 3) многочисленные результаты исследований в области цемента, бетона, накопленные в различных странах мира;
- 4) увеличение возможностей компьютеров;

- 5) увеличение возможностей коммуникации;
- 6) новые способы и методы исследования свойств материалов;
- 7) компьютерные базы данных;
- 8) развитие экспертных систем;
- 9) создание и развитие симуляционных моделей.

Последние три пункта создают возможности для компьютерного отображения знаний о цементе и бетоне, которые дополняют друг друга и будут связаны в систему объединенных знаний.

Безусловно, что компьютерные модели «виртуального» бетона позволят обеспечить ускоренные темпы прогресса в области технологии цемента и бетона, создадут возможности выполнить исследования в более короткие сроки по отношению к реальному времени. Прогнозы, полученные на моделях, могут быть очень ценными с точки зрения понимания сложных разноуровневых проблем, в которых физический эксперимент является слишком сложным, дорогостоящим и требующим значительных затрат времени (например, оценка дефектности структуры). Так симуляционные модели [31] гидратирующей цементной системы позволили взглянуть на эффекты, вызванные различным распределением зерен цемента по форме и размерам (эффекты упаковки), изменением водоцементного отношения, степени гидратации на прочность виртуального цементного камня, его усадку, сроки схватывания, влажность и температуру, миграцию внутри порового пространства (диффузионную проницаемость), реологические свойства.

Как отмечается в работе [30], из всех усовершенствований, которые повлияют на технологию цемента и бетона в XXI веке, технология «виртуального» цемента и бетона, возможно, является наиболее перспективной не только в научном, но и в практическом плане. Эта технология может стать возможной благодаря прогрессу в материаловедении (особенно компьютеризированной науки), повышению возможностей компьютеров и созданию информационного «суперкоридора». Эту технологию следует выражать в форме систем объединенных знаний (систем, поддерживающих решения), состоящих из точных симуляционных моделей, баз данных и экспертных систем, основанных на накопленном знании. Это дает новые возможности в принятии решений, касающихся прогресса в технологии цемента и бетона при разработке и совершенствовании материалов, позволяет избежать чрезмерных материальных расходов.

Список литературы

- 1 Monteiro P. J., Metha P. K. *Concrete. Microstructure, Properties and Materials.*— Berkley, Calif. 2001. — 470 p.
- 2 СНБ 5.03.01–2002. Бетонные и железобетонные конструкции.
- 3 EN 1992–1:2002 (Final Draft, 2002) Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Building.— Brussels, 2002. — 230 p.
- 4 ACI 318–95. Building Code Requirement for Reinforced Concrete. — ACI 318–95 – American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995 – 369 p.
- 5 CSA A 23.3–94. Design of Concrete Structures.— Canadian Standards Association, 1994. — 200 p.
- 6 Architectural Institute of Japan, Design Guidelines for Earthquake Resistance Reinforced Concrete, 1990. — 149 p.
- 7 Okamura H., Ozawa K.: Mix Design for Self-Compacting Concrete. Concrete Library of JSCE, — 1995. — № 25.
- 8 Holschemacher K. Bemessungsrelevante Eigenschaften von selbstverdichtenden Beton. Selbstverdichten der Beton, Eds. G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, Bauwerk Verlag GmbH. — Berlin. 2001.
- 9 Ludwig H. M., Weise F., Hemrich W. Self-Compacting Concrete – Principles and Practice. Investigation in to the Basis Mix Formulation, Comparison of SCC and Various Vibrated Concretes, SCCc with Different Filler Components, SCC with Air Pores, Stabilization of SCC, BFT. — 2001. — № 6.
- 10 Greszczyk S. Beton samozageszczalny – projektowanie, właściwości, kierunki rozwoju.— Inz. I bud. — 2002. — № 9.
- 11 Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика.— 2-е изд., перераб. и доп.— М., 1998.— 768 с.
- 12 Lota J. S., Kendall K., Bensted J. Mechanism of the modification of Portland cement hydration using polyacrylic acid.— Advanced in Cement Research.— vol. 12. — 2000. № 2. — P. 45–46.
- 13 Jennings H. M., Taleb H., Frohnsdoff G., Clifton J. R. Interpretation of the effects of retarding admixtures on pastes of C₂S, C₃A, plus gypsum and P.
- 14 Glasser P. F. The use of metakaolin in cement and concrete. London: Proceeding of the Society of Chemical Industry, — 1997.
- 15 Ramachandra V. S., Malhotra V. M. Superplasticizers in Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science and Technology. New Jersey: Noyes Publications, — 1995. P. 410–517.
- 16 Collepardi M. M. Water reducers/retarders in Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science and Technology. New Jersey: Noyes Publications, — 1995. — P. 286–409.
- 17 Birchall J. D., Thomas N. L. The mechanism of retardation of setting of OPC by sugar. Proceeding of the British Ceramic Society, 1984. — vol. 35. — P. 305–315.

18 *Radocea A.* Autogenous volume change of concrete at very early age // Magazine of Concrete Research. – 1990. – vol. 50, № 2. – P. 107–113.

19 *Igarashi S., Bentur A., Kovlek K.* Stress and creep relaxation induced in restrained autogenous shrinkage of high-strength pastes and concrete. Advances in Concrete Research, – 1999. – vol. 11, № 4. – P. 169–177.

20 *Brengel K., J. de Vries.* Mixture optimization of HPC in view of autogenous shrinkage. Proc. 5th Int. Symp. on Utilization of High Strength/ High Performance Concrete, Sandefjord. 1999. – P. 1041–1050.

21 *Jensen O. M.* Influence of cement composition on autogenous deformation and change of relative humidity. Proc. Shrinkage 2000. – Paris: Int. RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, 2000.

22 *Lianf Zhang, Mushen Su, Yanmon Wang.* Development of the use of sulfo- and ferro-aluminate in China. Advanced of Concrete Research, 1999. – vol. 11, № 01. – P. 15–21.

23 *Zhang L., Su M. Z.* Properties and use of high-strength concrete with ferro-alluminate cement. China: Concrete and Cement Products, 1994. – № 6.

24 *Kinuthia J. M., Wilds et al.* Self-compensating autogenous shrinkage in Portland cement – metakaolin – fly ash pastes. – Advances of Concrete Research. 2000. – vol. 12, № 1. – P. 35–43.

25 *G. Xu, Beaudion J. J.* Effect of Polycarboxylate Superplasticizer on Contribution of Internal Transition Zone of Electrical Conductivity of Portland Cement Mortar. ACI Material Journal, 2000. – v. 97, № 4. – P. 418–424.

26 *Feng N. Q., Shi, Hao T.-Y.* Influence of ultrafine powder on the fluidity and strength of cement paste. Advances in Cement Research. 2000. – v. 12, № 3. – P. 89–95.

27 *Sicker A.* The Influence of Superplasticizer on the Autogenous Shrinkage of High Performance Concrete. – Lacer, 1999. – № 4. – P. 89–95.

28 *Ferraris C., Brower L, u dp.* Workability of Self-Compacting Concrete. – PCI/FHWP/FIB, September 25–27, Orlando, Florida, 2002. – P. 298–407.

29 *Тур В. В.* Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при использовании напрягающего бетона. – Брест, 1998. – 270 с.

30 *Frohnsdoff G., Clifton J., Garboczi E., Bentz D.P.* Virtual cement and concrete. – PCA Emerging Technologies Symposium on Cement in the 21st Century. 1995.

31 *Bentz D. P.* A Three-Dimensional Cement Hydration and Microstructure. Program I – Hydration Rate, Heat of Hydration, Chemical Shrinkage. – NIST, 1995.

Получено 17.09.2003 г.

ISBN 985–6550–90–4. Перспективы развития новых технологий в строительстве
и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь. Гомель, 2005

УДК 69.035.4

А. С. ЧИКИЛЕВ, Н. И. МАКАРОВ, В. К. КУЗМЕНКОВ
ОАО "Гомельпромстрой"

ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Представлены визитная карточка и историческая справка ОАО «Гомельпромстрой». Рассмотрены особенности возведения отдельных элементов внешних инженерных сетей (самотечных коллекторов, напорных водоводов, переходов под автодорогами, канализационной насосной станции «Южная»).

Визитная карточка. ОАО "Гомельпромстрой" является одной из ведущих и старейших строительных организаций Республики Беларусь, созданной в 1944 году для восстановления разрушенного войной народного хозяйства города Гомеля и области, имеет многолетний опыт качественного и быстрого возведения объектов различного назначения.

Структура ОАО "Гомельпромстрой", мобильность его филиалов, наличие производственной базы и имеющиеся деловые связи позволяют работать автономно на значительном удалении от мест основной дислокации, применять различные современные строительные и отделочные материалы. Общество располагает проектно-конструкторской мастерской, комплектами службами и филиалом, позволяющими брать подряд на строительство совместно с проектированием и поставкой оборудования, т. е. "под ключ".

В ОАО "Гомельпромстрой" имеется парк машин, механизмов и оснастки для осуществления всего комплекса общестроительных и специальных работ, в том числе для возведения конструкций, зданий и сооружений из монолитного железобетона: автобетоновозы, бетононасосы, различные опалубки, в том числе объемно-переставная тоннельного типа. Обладая солидным производственно-техническим потенциалом, коллектив ОАО "Гомельпромстрой" в совершенстве овладел про-