

НОВЫЕ БЕТОНЫ И КОНСТРУКЦИИ

РОССИЯ – ВПЕРЕД!?

В статье приводятся новые данные по получению бетонов с высокими строительно-техническими свойствами, а также данные испытаний бетонов, показавшие практическую возможность снижения расхода цемента в бетонах до 150 кг на кубометр с получением бетонов марки В 45-В50, водонепроницаемостью W20 и морозостойкостью более 300 циклов. Дается объяснение полученных результатов на атомарном и молекулярном уровнях. На примерах некондиционного нерудного сырья ряда регионов показана возможность получения высококачественных бетонов на наноцементе. Кроме того, приводятся данные о разработке дренирующих бетонов для оснований аэродромных и дорожных покрытий, получаемых по технологии капсуляции зерен крупных заполнителей цементным раствором.

Наноцементы* позволяют радикально уменьшить объемы транспортных перевозок нерудных материалов, значительно снизят стоимость бетонов. Бетоны на основе наноцементов могут заметно повысить эффективность строительства монолитных и сборных аэродромных полос, автомобильных дорог и площадок.

Портландцемент является основной составляющей бетонов, определивших практически все области строительства: жилье и дороги, плотины и аэродромы, причалы и мосты. Поверхность планеты непрерывно пополняется конструкциями и покрытиями из миллиардов кубометров бетона благодаря производству уже более 2 млрд тонн цемента.

Доля стоимости цемента в бетонных смесях составляет около 60–70%, и вопросы снижения его расхода – одна из ключевых проблем уменьшения себестоимости строительства.

Во всем мире наблюдается переход на более высокие марки бетонов. Новые бетоны получили в мировой практике строительства название High Performance Concrete (HPC). HPC должны обеспечивать срок службы изделий и конструкций не менее 200 лет, а в перспективе – и все 500 лет. Высококачественные бетоны радикально увеличили возможности строительства для возведения небоскребов, мостов, тоннелей, плотин, шахт и подводных сооружений.

В настоящее время такие бетоны с высокими характеристиками производятся с применением тщательно подобранных компонентов смесей. Попытки получения более активных цемента для высокопрочных бетонов ведутся во многих странах. Можно указать на первый такой специальный цемент – Nanodur CEM II/B-S 52,5 R, производимый более тонким измельчением цемента и кварцевого песка без ввода микрокремнезема, однако требующий значительных расходов цемента (более 600 кг на кубометр бетона) и специальных добавок для получения бетонов УHPC.

В отличие от этого подхода, *механохимическая активация цемента в сочетании с нанокапсуляцией* (целесообразно такие материалы назвать *наноцементами*) – это новое направление регулирования строительно-технических свойств и получения высококачественных бетонов типа HPC с вышеуказанными свойствами. Оно наиболее конкурентоспособно с обычным модифицированием бетонных смесей, упрощает требования к крупному и мелкому заполнителям, исключает применение микрокремнезема

и дорогих химических добавок, позволяет существенно снизить стоимость бетона, отказаться от его тепловой обработки.

Разработанная российскими учеными технология производства наноцементов позволяет значительно (до марок М 72,5 – М 82,5) повысить марочность чистоклинкерных портландцементов, а также организовать переход промышленности на производство малоклинкерных цементов с минеральными добавками, что дает возможность радикального уменьшения удельных энергозатрат на тонну цемента за счет снижения содержания портландцементного клинкера в таких цементах до 35–45% с сохранением высоких строительно-технических свойств материалов.

При производстве малоклинкерных наноцементов открывается возможность эффективного использования минеральных добавок не только в виде различных природных пушчолановых пород, не пригодных для бетонов мелких кварцевых песков, отходов вскрыши и т. п., но и в виде техногенных отходов – зол и шлаков различных производств, переработка которых превратилась в значительную экологическую проблему.

Высокий потенциал наноцементов позволил подойти к возможности применения некондиционных, местных мелких и крупных заполнителей для производства качественных бетонов. В настоящее время значительную часть стоимости бетонов составляют затраты на перевозку кондиционного песка и щебня, зачастую на тысячу и более километров.

Нерудные строительные материалы производятся практически во всех регионах страны, но распределение производств не соответствует уровню активного строительства в федеральных округах. Это связано с массивным завозом высокопрочного щебня из скальных пород в Центральный и Южный (Сочи) федеральные округа из Северо-Западного

* Наноцементы – цементы, характеризующиеся наличием сплошной нанокапсулы (оболочки) на частичках материала толщиной в несколько десятков нанометров из модифицированного полимерного вещества.

(Ленинградская область, Республика Карелия) и Уральского (Свердловская и Челябинская область) федеральных округов. Причем стоимость перевозки часто в несколько раз превышает цену щебня. Это обусловлено отсутствием в ЦФО и ЮФО выходов скальных пород.

Так, стоимость гранитных щебней, доставляемых в район Сочи из разных регионов России, составляет в настоящее время около 1500 рублей, строительного песка – около 1300 рублей за каждую тонну. Для производства более чем 10 млн кубометров бетона в Москве и Московской области из далеких регионов (Кольский полуостров, Урал и др.) ввозятся многие миллионы тонн щебня, в то время как в Московской области и недалеко от нее существуют десятки карьеров с известняковым щебнем, вполне пригодным для получения не только ординарных, но и высокопрочных долговечных бетонов. Стоимость таких щебней не превышает 500 рублей за тонну, местных песков – не более 200–300 рублей за тонну.

Использование некондиционного сырья для получения высокопрочных и прочных бетонов на основе нанощебней – ключевое достижение ОАО «Московский ИМЭТ», имеющее мировое значение в технологии бетонов. По заказу ФГУП «АГАА» и ОАО «УСК «МОСТ» в течение 2009–2010 годов институтом были выполнены исследования по подбору составов бетона широкого назначения на сырьевых материалах регионов России, в том числе и на некондиционных мелких и крупных заполнителях. Строительно-технические свойства бетонов, в соответствии с пожеланиями заказчиков, определялись испытательной лабораторией ГУП «НИИМосстрой». Было приготовлено два состава сухих механически активированных смесей (СМС) по ТУ – 5745-067-05442286-99: СМС-40, включающий 40% портландцемента, 46% кварцевого песка, 7% доменного шлака, 7% золы ТЭС; СМС-90, включающий 90% портландцемента, 10% кварцевого песка.

В качестве исходного портландцемента для получения СМС-40 и СМС-90 применялся цемент Мордовского завода М-500Д ОН, для бетонных смесей применяли щебень Павловского карьера

М-1200 и строительный песок Раменского карьера Мкр 2,5, соответствующие требованиям ГОСТ на нерудное сырье для бетонов.

Результаты, полученные нами при испытаниях в ГУП «НИИМосстрой» малоклинкерных нанощебней, значительно превышают высшие мировые достижения (автор приносит глубокую благодарность сотрудникам ГУП «НИИМосстрой», проводившим испытания).

В табл. 1 приводятся составы бетонных смесей без применения каких-либо химических добавок. Полученные основные характеристики бетонов достаточно красноречивы. По пожеланиям заказчика работ в ГУП «НИИМосстрой» были проведены также и испытания нанощебней в бетонах после года хранения испытанной партии в бумажной таре на складе заказчика (результаты испытаний также приведены в табл. 1).

Анализ результатов сравнительных испытаний позволяет констатировать следующее:

■ энергосберегающие малоклинкерные нанощебни отличаются высокими строительно-техническими свойствами, и при содержании 40% портландцемента малоклинкерные нанощебни при фактическом расходе портландцемента 148 кг на 1 кубометр бетона позволяют достичь уже в трое суток нормального твердения класса В 35, в семь суток – В 40 и в 28 суток – нормального твердения В 50, при высокой морозостойкости и водонепроницаемости W 20;

Нанощебни с небольшим количеством (10% масс.) минеральных добавок позволяют уже в одни сутки нормального твердения достичь класс бетона В 25, в трое суток – В 35, а в 28 суток – В 60.

В испытательной лаборатории ГУП «НИИМосстрой» по заказу ОАО «УСК «МОСТ» были проведены также работы по определению строительно-технических свойств бетонов на малоклинкерных нанощебнях из механически активированных портландцементов различных заводов и некондиционных нерудных материалах в виде

щебней горных выработок и местных строительных песков.

В табл. 2, 3 приводятся результаты подбора составов тяжелых бетонов на малоклинкерных нанощебнях и нерудном сырье различных регионов, включая продукты переработки горных пород.

В качестве исходного портландцемента для производства нанощебней (СМС) использовали портландцемент М-500, ДОН (ОАО «Новоросцемент») и кварцевый песок Раменского карьера Московской области. Портландцемент Новороссийского цементного завода по данным выполненного рентгеновского количественного анализа фазового состава (РКА) относится к высокоалюминатным с минералогическим составом, % масс.: алита – 60; белита – 20; алюминатов кальция – около 5; алюмоферритов кальция – около 13. Обнаружено присутствие небольшого количества гипса, следы шпинели и периклаза. Для приготовления бетонных смесей на малоклинкерных нанощебнях в качестве крупного заполнителя применяли фракции 5–20 щебней и грунтов горной выработки различных регионов с местными строительными песками.

Попытки получения качественных бетонов на местном, часто некондиционном нерудном сырье, помимо необходимости перерасхода портландцемента, даже при применении дорогостоящих химических добавок, зачастую не обеспечивают требуемых качеств бетонов при строительстве в том же регионе различных сооружений, а также дорог, мостов, тоннелей и эстакад.

Применение нанощебней позволяет радикально ускорить темп твердения бетонов, отказаться от энергозатратной пропарки, получить бетоны класса НРС и изделия на их основе с меньшими затратами энергии, труда, повысить технологический уровень всех областей применения бетонов, как монолитных, так и сборных, упростить технологии формирования изделий и конструкций с применением современных достижений безопалубочного формования. Это качественный скачок в технологии бетонов! Бетоны на нанощебнях имеют более низкую стоимость: по расчетам специалистов ОАО «УСК «МОСТ», за

№ п/п	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси, кг (В/Ц=0,375 ОК=3)	Прочность бетона нормального твердения, МПа								Характеристики		
		в числителе – через два месяца после изготовления наноцементов / в знаменателе – через один год хранения цементов в мешках								плот- ность, кг/м ³	Мо- розо- стой- кость, циклы	водоне- проница- емость
		1 сут.		3 сут.		7 сут.		28 сут.				
при изги- бе	при сжа- тии	при изги- бе	при сжа- тии	при изги- бе	при сжа- тии	при изги- бе	при сжа- тии					
1	малоклинкерный СМС-40 – 370, в том числе: портландце- мент – 148	2,7	19,7	4,2	40,2	5,1	47,3	5,4	66,2	2455	>300	W20
	кремнеземистые до- бавки (песок, шлак, зола) – 222 + песок – 725 щебень – 1225 Вода – 139		—		—		—		—			
2	СМС-90 – 353 кг, в том числе: портланд- цемент – 301,5 кг	4,2	36,6	4,5	49,9	5,9	63,4	7,3	80,0	2475	>300	W20
	кремнеземистые до- бавки (песок, шлак, зола) – 34,5 + песок – 735 щебень – 1240 Вода – 126		—		—		—		—			

Табл. 1. Результаты испытаний бетонов на основе наноцементов и на кондиционном нерудном сырье составов СМС-40 и СМС-90 Московского ИМЭТ в ГУП «НИИМосстрой» по заказу ФГУП «АГАА»

счет снижения расхода портландцемента и применения местных нерудных материалов достигается экономия затрат в пределах от 500 до 700 рублей на кубометр бетонной смеси только на материалах.

Приведенные доводы подтверждаются результатами многолетних испытаний

наноцементов в бетонах, которые уже в первые сутки нормального твердения на кондиционных заполнителях показали класс В 30, в трое суток – класс В 40, в 7 суток – класс В 50 и в 28 суток – класс В 65 при высокой морозостойкости и водонепроницаемости W 20 (табл. 1).

Как показали результаты исследований и испытаний, применение малоклинкерных наноцементов позволяет получать высокопрочные быстротвердеющие бетоны с пониженными расходами портландцемента даже на некондиционных крупных и мелких заполнителях.

Так, состав бетонной смеси № 1 (табл. 2) включает в виде крупного заполнителя грунт Южного портала ж/д тоннеля № 3 фракции 5–20 мм с маркой по дробимости М-300, содержанием зерен пластинчатой и игольчатой формы 17% масс., остатку на сите 5 83.2%, содержанию пылевидных и глинистых частиц 3,5% масс., с морозостойкостью F – 25. Это делает его не соответствующим требованиям ГОСТ 8267-93 и 26633-91. Исследование минералогии грунта методом рентгеноструктурного количественного анализа показало, что в качестве основной минеральной фазы (около 80% масс.) он содержит анальцит – $\text{Na}_2\text{OAl}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, а также до 10% масс. кальцита, до 5% масс. полевого шпата и до 5% масс. каолинита. Всего 335 кг портландцемента, превращенного в наноцемент, даже с таким крупным заполнителем, оказалось достаточно, чтобы произвести быстротвердеющий (80% прочности в первые трое суток твердения) бетон класса В 55, с водонепроницаемостью W 16 и морозостойкостью более 300 циклов (состав 1, табл. 2).

Применение более прочного крупного заполнителя в виде щебня горной выработки ТО № 12 «Бамтоннельстроя» Хабаровского края позволяет с 307 кг наноцемента получить бетон также с высокими показателями – состав 2 по табл. 3: марка более 700, прочность на изгиб 7,5 МПа, водонепроницаемость W 20 и морозостойкость более 300 циклов. Известняковый щебень (по данным РКА, содержащий 96% масс. кальцита), маркой по дробимости М-600 и морозостойкостью F 50 с содержанием пылевидных и глинистых частиц 5,1% (вместо не более 2% по ГОСТ) фракции 5–20 мм из грунта ЗАО фирмы «Сочинеруд» карьера «Каменский», при снижении расхода портландцемента до 190 кг на кубометр бетонной смеси и применении его в виде наноцемента позволил получить высокую прочность в начальные сроки твердения при классе бетона В 35, водонепроницаемости W 20 и высокой морозостойкости (состав 3).

Если первые три состава бетонных смесей по табл. 2 были уложены с подвижностью П-1 и П-2, то остальные три состава с пониженным содержанием портландцемента были уложены с подвижностью П-3 и П-4. В составах 4–6 по

табл. 3 бетонные смеси готовили с крупным заполнителем фракции 5–20 мм в виде щебней горных выработок ООО «Стройсервис» и ООО «Стройтехмонтаж». Указанные щебни республики Северная Осетия – Алания относятся к гранитно-диабазовым породам и имеют хорошие показатели. Поставленные щебни обоих карьеров относятся к гранитно-диабазовым породам и, по данным выполненного РКА, характеризуются следующими минералогическими составами, % масс.:

	ООО «Стройсервис»	ООО «Стройтехмонтаж»
β-кварц	35	30
амфиболы	18	19
плагиоклазы	12	10
хлориты	12	10
доломит	10	–
кальцит	6	18
слюды	6	9
стекло-видная (аморфная фаза)	остальное	остальное

Исследованные пески в виде кремнеземистой составляющей содержат β-форму SiO_2 , содержание которой максимально в мелких фракциях Раменского и Садонского песков. В более крупных фракциях этих песков (более 1,25 мм) увеличивается количество сопутствующих минералов – плагиоклазов, хлоритов с небольшим количеством кальцита и слюдистых. В Майском песке с $M_{кр} = 2,52$ преобладают полевые шпаты и амфиболы. Садонский песок относится к отсевам дробления гранитных пород с модулем крупности 3,17. Малоклинкерные наноцементы позволяют получать хорошо укладываемые и транспортируемые бетонные смеси с подвижностью П-3 и П-4, включая и литые смеси с высокими строительно-техническими свойствами, даже при существенно более низком содержа-

нии портландцемента (составы 3–6 по табл. 3).

Полученные удельные расходы портландцемента на кубометр бетона можно отнести к мировым рекордным показателям. Новые экспериментальные данные доказывают весьма высокий темп твердения бетонов даже с небольшими расходами цемента при достижении хорошей прочности, высокими водонепроницаемостью и морозостойкостью цементного камня в бетонах на наноцементах; нет сомнений и в хорошей защите арматуры новых бетонов с такими показателями водонепроницаемости, которые характеризуют высокую плотность цементного камня и контактных зон.

Наблюдение сколов образцов бетона практически всех исследованных составов показало однородную структуру цементного камня, с высокоплотной контактной зоной на границе с зёрнами

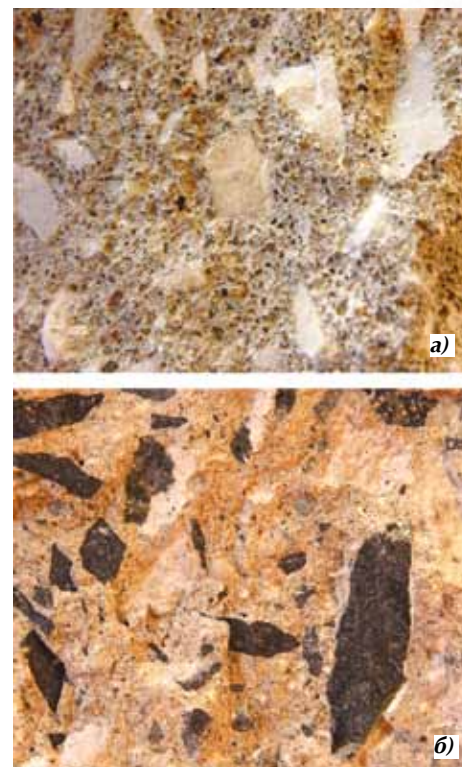


Рис. 1. Фотографии сколов образца бетона на некондиционных крупных заполнителях: а) состава № 3, табл. 2; б) состава № 1, табл. 2 после механических испытаний. Наблюдается разрушение материала непосредственно по зёрнам щебня. Образцы испытаны после 7 суток нормального твердения

крупного заполнителя, формирующейся уже в начальные сроки твердения бетонов (рис. 1).

№ п/п	Расход материалов на 1м ³ бетонной смеси, кг	ОК	Прочность бетона нормального твердения, в различные сроки, МПа: в числ. – при сжатии, в знам. – при изгибе			Характеристики бетонов		
			3 сут.	7 сут.	28 сут.	D, кг/м ³	W	F
1	Малоклинкерный СМС-90 – 395, в том числе: портландцемент – 355 молотый песок – 40 + в бетонной смеси : песок Раменский (Московская обл.) ,Мкр. 2,63 920 грунт Южного портала ж/д тоннеля №3, М-300 – 921 вода – 145 (вход. № лаб. 97-1)*	3	<u>57,6</u> 4,3	<u>64,2</u> 4,6	<u>72,4</u> 7,0	2415	16	>300
2	Малоклинкерный СМС-75 – 410, в том числе: портландцемент – 307 молотый песок – 103 + в бетонной смеси: песок Раменский – 956 щебень из горной выработки «ТО №12 Бамтоннельстрой», М-1400 , F-300 – 956 вода – 123 (вход. № лаб. 101-9)	8	<u>67,1</u> 5,0	<u>67,1</u> 7,2	<u>73,4</u> 7,5	2480	20	>300
3	Малоклинкерный СМС-50 – 380, в том числе: портландцемент – 190 молотый песок – 190 + в бетонной смеси : песок Раменский – 887 щебень карьера Каменский, М-600 , F – 50 – 887 вода – 165 (вход. № лаб. 99-7)	7	<u>35,6</u> 3,7	<u>43,0</u> 4,1	<u>43,5</u> 4,6	2350	20	300

Табл. 2. Результаты стандартных испытаний бетонов на основе малоклинкерных нанощементов в ГУП «НИИМОСстрой» на основе некондиционных заполнителей. *Здесь и далее – обозначение партии в испытательной лаборатории ГУП «НИИМОСстрой»

№ п/п	Расход материалов на 1м ³ бетонной смеси, кг	ОК	Прочность бетона нормального твердения в различные сроки, МПа:			Характеристики бетонов		
			в числ. – при сжатии, в знам. – при изгибе			D, кг/м ³	W	F
			3 сут.	7 сут.	28 сут.			
4	Малоклинкерный СМС-40 – 401, в том числе: портландцемент – 160 молотый песок – 241 + в бетонной смеси: песок Майский – 802 щебень ООО «Стройсервис», М-1200 1042 вода – 176 (вход. № лаб. 126-28)	18	<u>31,8</u> 4,7	<u>44,4</u> 5,0	<u>53,3</u> 6,0	2515	14	>300
5	Малоклинкерный СМС-40 – 297, в том числе: портландцемент – 119 молотый песок – 178 + в бетонной смеси: песок Садонский – 976 щебень «Стройтехмонтаж», М-1000 976 вода – 229 (вход. № лаб. 113-19)	16	<u>12,9</u> 5,0	<u>17,0</u> 7,2	<u>22,1</u> 7,5	2405	8	300
6	Малоклинкерный СМС-40 – 211, в том числе: портландцемент – 84 молотый песок – 308 + в бетонной смеси: песок Садонский – 898 щебень «Стройтехмонтаж», М-1000 – 898 вода – 171 (вход. № лаб. 117-21)	14	–	<u>8,0</u> 1,8	<u>11,1</u> 2,0	2410	6	200

Табл. 3. Результаты стандартных испытаний бетонов на основе малоклинкерных нанозцементов Московского ИМЭТ в ГУП «НИИМосстрой» с применением некондиционных заполнителей при минимальных расходах цемента

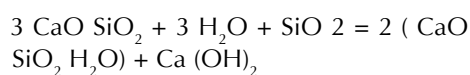
	Раменский	Майский	Садонский
β-кварц	73	5	51
амфиболы	7	11	–
плагиоклазы	9	54	16
хлориты	6	3	13
доломит	–	3	–
кальцит	–	4	6
слюды	3	2	11
стекловидная (аморфная) фаза	–	16	3

Все бетоны на основе портландцемента включают обязательным компонентом кварцевый песок, частички которого играют роль не только «мелкого заполнителя», но и реагента, вступающего в химическую реакцию с продуктами гидратации портландцемента, с образованием на конечной стадии основных минералов, обеспечивающих прочность и долговечность бетонам, – гидросиликатов кальция.

Строительный песок в обычных бетонных смесях, применяемый в настоящее время во всем мире, характеризуется наличием весьма крупных частиц кремнезема и кремнеземистых минералов: размер подавляющего объема частиц составляет от 300 до 1000 мкм, что делает малопродуктивными реакции образования гидросиликатов на поверхности частичек песка, не превышающей 50–70 м²/кг при вза-

имодействии в присутствии воды со значительно более мелкими частицами цемента размером в 5–20 мкм при средней удельной поверхности портландцемента в России 300 м²/кг, а за рубежом – 400 м²/кг. Мало того, мелкозернистые пески по существующим в мире стандартам непригодны для производства бетонов в связи с увеличением при их применении водопотребления бетонных смесей и снижением прочности бетонов.

Упрощенный вариант химической реакции, необходимой для формирования цементного камня, с указанием начального и конечного состава реагентов:



В современных бетонах взаимодействие составляющих в системе цемент-вода-песок идет весьма длительно и только в малоразвитых зонах контакта частиц, несмотря на соотношение песка и цемента обычно 2:1, прежде всего, из-за малой реакционной поверхности химически инертных частиц песка. Это объясняет, почему во многих странах ученые приходят к целесообразности ввода молотого кремнезема (а также зол, шлаков, пуццолановых пород) для повышения активности формирования цементного камня при снижении клинкерной составляющей. В бетонах на малоклинкерных наноцементе реакции между частичками цемента и песка многократно ускоряются в связи с тем, что размеры их практически совпадают и составляют от нескольких до двух десятков мкм при средней удельной поверхности твердых частиц около 500 м²/кг с пониженным количеством воды в системе, активно усваиваемой формирующимися гидросиликатами.

В твердеющем цементном камне присутствует два вида гидратных минералов: гидросиликаты кальция и гидроксид кальция. Соотношение масс указанных фаз цементного камня, % масс.:

- гидросиликаты кальция – 85;
- гидроксид кальция – 15.

Казалось бы, содержание гидроксида кальция невелико, но именно его

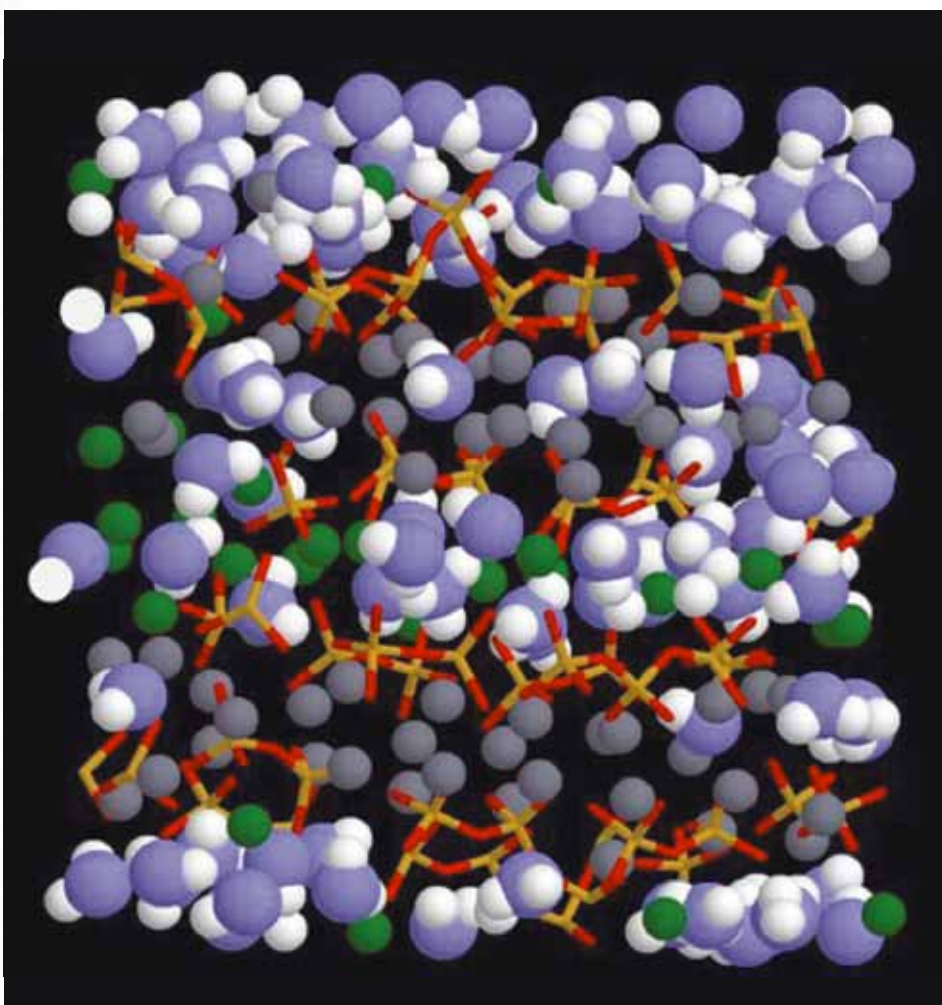
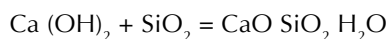


Рис. 2. Молекулярная модель CSH. Голубым и белым цветом показаны атомы кислорода и водорода в молекуле воды, серым и зеленым – ионы кальция (внутрислойные и межслойные), желтыми и красными палочками – атомы кремния и кислорода в тетраэдрах

присутствие значительно ослабляет строительно-технические свойства цементного камня, и прежде всего – прочность, в связи с пластинчатой, слоевой морфологией кристаллов гидроксида кальция, между слоями которого обычно проходит разлом камня.

В этой связи для повышения прочностных свойств цементного камня желательнее отсутствие в нем гидроксида кальция, но еще более эффективный вариант – связывание гидроксида кальция в главный продукт бетона, более прочный и долговечный гидросиликат кальция, что может происходить по реакции:



Такая реакция происходит в разработанных нами малоклинкерных наноцементных, где она обеспечивается уровнем дисперсии кремнезема (от нескольких мкм до десятков мкм), сопоставимым с размерами частиц цемента. Так, содержание гидроксида кальция в бетонах на обычном портландцементе и малоклинкерных наноцементных составляет в различные сроки твердения, % масс.:

	3 суток	7 суток	14 суток	28 суток	60 суток
Портландцемент	3,2	5,5	6,4	7,1	8,2
СМС-75	1,5	2,5	3,0	2,7	2,4
СМС-50	0,8	1,1	1,6	1,5	1,3
СМС-40	0,5	0,9	1,4	1,2	1,0

Эти данные подтверждаются многолетней практикой работы с малоклинкерными наноцементными, в бетонах, на основе которых гидроксид кальция практически не идентифицируется.

В бетонах таких цементов наблюдается интенсивный рост прочности цементного камня даже при рекордно низком количестве цемента в бетонной смеси с одновременным повышением основных показателей цементного камня и бетонов (прочности, водонепроницаемости, морозостойкости) и возможностью применения некондиционного сырья, так как прочность и остальные свойства определяются не качествами

зерен крупного или мелкого заполнителей, а цементным камнем (табл. 1–3).

Этот факт наглядно подтверждается тем, что во всех бетонах на наноцементных при их механическом разрушении характерным является разлом частиц крупного заполнителя (рис. 1) и весьма острые, режущие кромки цементного камня.

В работе автора (М.Я. Бикбау. *Нанотехнологии в производстве цемента* – М., ОАО «Московский ИМЭТ», 2008. – 768 с.) с помощью рентгеноструктурного анализа лучших из когда-либо ранее полученных монокристаллов всех известных модификаций алита и белита, выращенных нами впервые в мире по разработанному и запатентованному методу «раствор в расплаве», было показано, что алит (C₃S) и белит (β-C₂S) содержат в своих кристаллических решетках кластеры из триад тетраэдров кремнезема [SiO₄]⁴⁻ в кальциево-кислородном окружении, в виде повторяющихся в пространстве лент – Ca – O – Si – O – Si – O – Si – O – Ca – с присутствием части атомов кальция в более высокой (выше обычной шестерной) координации по кислороду. Более высокая координация атомов кальция в цементных высокоосновных силикатах обеспечивает повышение степени ионности их связей с кислородными атомами, определяя способность минералов к взаимодействию с водой при их гидратации.

Развитие указанных представлений позволило предположить, что указанные кластеры могут с минимальными изменениями переходить из безводных фаз в гидросиликатные новообразования, структурируясь активными молекулами воды, адсорбирующимися внутрь цементных зерен и образующими близкие по строению кластеры гидросиликатов кальция.

С этим открытием согласуется последнее достижение группы физиков США, Франция и др. (Pellenq R. J.-M., Kushima A., Shahsavari R., van Vliet, K.L., Buehler M.J., Yip S., Ulm F.-J. *A realistic molecular model of cement hydrates*. // *Nat Academy of Science. Proceedings, Wash., 2009, v. 106, 38, pp. 16102-16107*), которые разработали так называемую *реалистическую молекулярную*

модель цементного камня на основе новой модели нанокластера гидросиликатов кальция CSH. Основа кластера – кремнекислородный неполносвязанный каркас. Слой кальция привязан к нему через кислородные мостики с редкими межслоевыми катионами кальция. Вода представлена в молекулярной форме в виде слоев вдоль основы кластера и в ее пустотах (рис. 2).

В двумерном пространстве один базовый элемент гидратированного цемента содержит некоторые отклонения, характерные для природного гидросиликата кальция – тоберморита. В новой структуре CSH в слоях треугольников (кремниевых тетраэдров) каждый третий, шестой и девятый из них отклонены от горизонтальной оси вверх или вниз (в сторону соседних слоев оксида кальция). В образовавшихся «полостях» (в слоях, сформированных лентами оксида кальция) располагаются молекулы воды, которые и придают твердеющему цементному камню его прочность.

Таким образом, гидросиликаты кальция не являются кристаллами в чистом виде, а представляют собой некий гибрид кристаллической и аморфной составляющих. Они соответствуют всем признакам метамиктных структур.

Описанная выше модель получения компьютерной стереоподгонкой расположения молекулярных групп – [SiO₄]⁴⁻, CaO, H₂O, OH – к показателям CSH-фазы: C/S 1,6; плотность (γ) 2,6 г/см³ – весьма близкая к реальным значениям. При создании модели структуры авторы не ориентировались на известные гидросиликатные минералы. Хотя расчетные спектрограммы получились сходными с данными по слоистому тобермориту и дженниту, но атомная структура модели принципиально иная, чем у упомянутых природных минералов.

(Продолжение в № 41)

М.Я. Бикбау,
д-р хим. наук,
генеральный директор
ОАО «Московский ИМЭТ»,
акад. РАЕН,
Нью-Йоркской академии