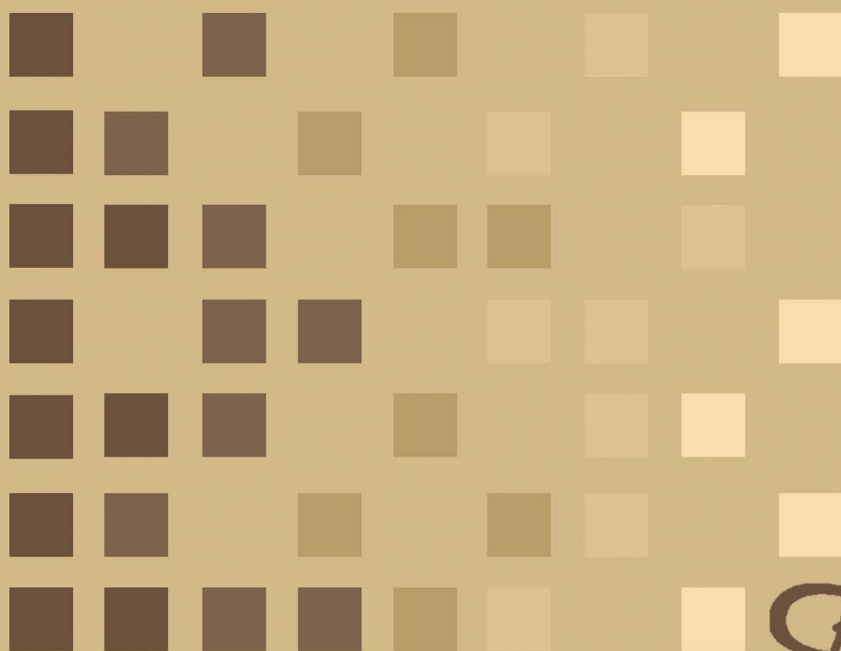


ЮАЙ ЮАНЬ, ВАН ЛИН, ТЯНЬ ПЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЙ ЦЕМЕНТНЫЙ БЕТОН С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ



**Юай Юань
Ван Лин
Тянь Пе**

**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЙ
ЦЕМЕНТНЫЙ БЕТОН
С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ**



**Издательство АСВ
Москва, 2014**

Юай Юань, Ван Лин, Тянь Пе. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами. – Москва: Издательство АСВ, 20144. – 448 с.

ISBN 978-5-93093-990-3

От переводчика

Наука о материалах, безусловно, является базой технического прогресса. Строительные материалы занимают важнейшее место в материаловедении, а бетон является ярким представителем строительных материалов. За сто лет развития он стал основным строительным материалом, массово используемым при строительстве дорог, мостов, пирсов, аэропортов, подземных и подводных сооружений, дамб и т. д. Поэтому можно без преувеличения сказать, что уровень развития современной экономики, промышленности и технологий неразрывно связан с успехами в области знаний о бетоне.

Несмотря на значительные достижения, не прекращаются исследования в области получения бетона с высокой прочностью и другими улучшенными свойствами (ВЦБ). В последние десятилетия изучение и применение ВЦБ является одним из самых актуальных направлений в области строительного материаловедения и решения инженерных задач. В Китае выполнено несколько научно-исследовательских работ, посвященных ВЦБ, результаты которых представляют бесспорный интерес для международного сообщества бетоноведов и были применены в крупных гидротехнических проектах, а также на сотнях объектов промышленного и транспортного строительства.

Настоящая книга охватывает следующий круг вопросов: сырьё для бетонов (вяжущее, химические и минеральные добавки, заполнители), характеристики ВЦБ (реологические и механические свойства, долговечность), технология изготовления ВЦБ, процесс гидратации и твердения, а также практические примеры инженерных работ с применением высококачественного бетона.

Из-за различий между китайскими и российскими нормативными документами в процессе редактирования возникло множество вопросов со стороны российских специалистов. Профессор Яо Ян, профессор Ван Лин и профессор Тянь Пей из Китайской академии строительных материалов, а также их коллеги профессор Ли Цинхай и сотрудники лаборатории старший инженер Гао Чунюн, доктор Ван Чжинди, инженер Лин Хэй, доктор Ву Хао, Ду Пэй, Ян Лю, Гань Цзечжун, Цао Ин, Бэй Цзе, Чжан Пин, Чжунь Фанган; профессор Тянь Цзинской академии строительной науки Хуан Цзинь, Дуань Банкуй, Чэн Чжанцин, Чэн Вэньбао, Чжан Юнчэн, Чэн Даоюй из Пекинского научно-исследовательского института угля, г-н Чжан Лунсюн, г-н Ли Зиюньяо и г-н Тан Гоминь из Тайваньской цементной компании «Шинфу» постарались максимально полно и подробно представить в настоящем издании технические данные, ответить на возникшие вопросы.

Мы выражаем глубокую благодарность госпоже У Ган из издательства химической промышленности КНР, а также госпоже Янг Пинхау и Ифан, представляющих Китайское агентство по авторским правам (КА-АП), которые сыграли важную роль в публикации перевода этой книги в России.

Мы искренне благодарны генеральному директору ООО «Издательство АСВ» Н.С. Никитиной за активное содействие развитию научно-культурного сотрудничества между двумя странами, особенно в области строительного материаловедения.

Выражаем свою признательность соученикам, коллегам по работе, преподавателям и профессорам в России. В частности, профессору Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета А.М. Харитонову, профессорам Дальневосточного государственного университета путей сообщения Б.В. Махнину и П.С. Красовскому; член-корр. РААСН, декану архитектурно-строительного факультета Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарева В.Т. Ерофееву, советнику РААСН, профессору кафедры строительных конструкций Национального исследовательского Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарева Т.А. Низиной.

Мы благодарны следующим сотрудникам за помощь в переводе: Джо Инчао, Донг Бин, Юн Сючунь, Ван Лянхуа, Цю Нин, Сюе Янбо, Чэнь Ли, Чжуан ДяньРонг, Ци Баоцзин, Сун Цзинью, Ю Тао, Ван жуй, Ци Баоцзе, Чен Чуанцзе, Чжоу Иньшэн, Бао Пин, Ван Шучжэнь, Цао Юйго.

Переводчик Го Ли выражает благодарность родителям – г-же Ци Гуйчжин и г-ну Го Фенцин, брату Го Чжигуан и его жене Юй Липин за заботу в повседневной жизни, создание благоприятных условий для работы над переводом данной книги.

Авторы будут благодарны всем читателям, которые выскажут свое мнение о книге и замечания по её содержанию.

Переводчик Го Ли

ISBN 978-5-93093-990-3

© Издательство АСВ, 2014

© Издательство химической промышленности, Пекин, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
ЧАСТЬ I. СЫРЬЕ ДЛЯ ВЦБ	12
ГЛАВА 1. ЦЕМЕНТ	12
1.1. Классификация и свойства китайских цементов	12
1.2. Виды цементов	14
1.2.1 Портландцемент	14
1.2.2. Портландцемент с минеральными добавками	14
1.2.3. Шлакопортландцемент	14
1.2.4. Пуццолановый портландцемент	15
1.2.5. Золопортландцемент	15
1.2.6. Композиционный портландцемент.....	15
1.3. Физические свойства цемента и его влияние на ВЦБ	16
1.3.1. Плотность и объемный вес портландцемента.....	16
1.3.2. Тонкость помола.....	16
1.3.3. Водопотребность	17
1.3.4. Сроки схватывания.....	18
1.3.5. Равномерность изменения объема цемента	18
1.3.6. Классы прочности	20
1.3.7. Тепловыделение цемента.....	21
1.3.8. Усадочные деформации	23
1.3.9. Износостойкость.....	23
1.3.10. Сульфатостойкость	23
1.4. Выбор цемента для ВЦБ	24
Список литературы	26
ГЛАВА 2. МИНЕРАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ	27
2.1. Тонкомолотый доменный гранулированный шлак	28
2.1.1. Исходный материал и производство	28
2.1.2. Физические свойства и химический состав	29
2.1.3. Хранение, упаковка и транспортировка	33
2.1.4. Влияние ДГШ на свойства ВЦБ.....	33
2.2. Зола-унос	39
2.2.1. Исходный материал и производство	29
2.2.2. Физические свойства и химический состав	40
2.2.3. Влияние золы на свойства ВЦБ	49
2.3. Микрокремнезем	64
2.3.1. Исходное сырье и производство микрокремнезема	64
2.3.2. Физические свойства и химический состав МК.....	65
2.3.3. Хранение, упаковка и транспортировка	67
2.3.4. Влияние микрокремнезема на свойства бетона.....	68
2.4. Природный цеолит	72
2.4.1. Исходный материал и производство	72
2.4.2. Технические требования	73
2.4.3. Влияние молотого природного цеолита на свойства бетона.....	75
Приложение «Показатели свойств минеральных добавок ВЦБ (по GB/T 18736)»	76
Список литературы	77

ГЛАВА 3. ЗАПОЛНИТЕЛИ.....	78
3.1. Классификация и свойства заполнителей	78
3.1.1. Крупный заполнитель	79
3.1.2. Мелкий заполнитель	81
3.2. Методы определения щелочной активности заполнителей	82
3.2.1. Методы испытания заполнителей на активность взаимодействия со щелочами цемента.....	83
3.2.2. Методы испытания заполнителей на щелочную активность	87
3.3. Анализ щелочной активности заполнителей, расположенных в районах Пекин, Тяньцзинь и Тангу	96
3.3.1. Расположение ресурсов заполнителей в районах Пекин, Тяньцзинь и Тангу.....	96
3.3.2. Метод определения и анализ щелочной активности заполнителей, расположенных в районах Пекин, Тяньцзинь и Тангу	97
3.4. Карьеры, содержащие безопасные заполнители, в районах Пекин, Тяньцзинь, Тангу.....	107
3.4.1. Требования для выявления карьеров с безопасными заполнителями	107
3.4.2. Классификация безопасных заполнителей и расположение их карьеров	107
3.4.3. Введенные в эксплуатацию карьеры в районах Пекин, Тяньцзинь и Тангу, содержащие безопасные заполнители.....	112
Список литературы.....	114
Глава 4. ХИМИЧЕСКИЕ ДОБАВКИ.....	115
4.1. Суперпластификаторы	115
4.1.1. Продукты конденсации сульфированного нафталина с формальдегидом (СНФ).....	116
4.1.2. Меламинсульфокислоты с формальдегидом (СМФ)	117
4.1.3. Феноло-формальдегидные смолы.....	120
4.1.4. Алифатические суперпластификаторы	121
4.1.5. Поликарбоксилатные добавки	122
4.2. Добавки, облегчающие перекачку бетона.....	124
4.3. Воздухововлекающие добавки	126
4.3.1. Виды и свойства воздухововлекающих добавок	127
4.3.2. Влияние воздухововлекающих добавок на свойства ВЦБ	128
Список литературы.....	131
ГЛАВА 5. СОВМЕСТИМОСТЬ ЦЕМЕНТА И ДОБАВОК	132
5.1. Понятие и метод определения совместимости	133
5.1.1. Понятие и оценка совместимости.....	133
5.1.2. Метод определения совместимости	135
5.1.3. Методы определения нормальной плотности цемента.....	138
5.1.4. Распływ конуса цементного теста	140
5.2. Факторы, влияющие на совместимость цемента и добавок.....	143
5.2.1. Основные причины, воздействующие на подвижность смесей при введении водопонизителей	143
5.2.2. Влияние свойств водопонизителей на совместимость цемента и добавок.....	146
5.2.3. Влияние физических и химических характеристик цементов на совместимость цемента и добавок.....	147
5.3. Способы улучшения совместимости цемента и добавок.....	161

5.4. Улучшение влияния минеральных добавок на совместимость цемента и химических добавок	162
5.5. Практические примеры анализа совместимости цемента и добавок	165
Список литературы.....	171
ЧАСТЬ 2. СВОЙСТВА ВЦБ	172
ГЛАВА 6. ПОДВИЖНОСТЬ ВЦБ	172
6.1. Методы определения подвижности ВЦ	172
6.1.1. Осадка конуса и подвижность бетона	173
6.1.2. Испытание методом V-образного конуса	174
6.1.3. Метод определения К-осадки	175
6.1.4. Метод отмывки крупных заполнителей	175
6.1.5. Метод испытания U-образного ящика	176
6.1.6. Испытание Orimet	177
6.1.7. Определение текучести методом J-кольца	178
6.1.8. Устройство L-образного ящика и результаты проведенных исследований	179
6.2. Реологические свойства растворов композиционных вяжущих на основе портландцементов	190
6.2.1. Реологические типы растворов и тиксотропия	191
6.2.2. Исследование изменения реологических параметров растворов во времени	195
Выводы	204
Список литературы.....	204
ГЛАВА 7. РАВНОМЕРНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ВЦБ	205
7.1. Контракционная усадка ВЦБ	205
7.1.1. Характеристики контракционной усадки ВЦБ	206
7.1.2. Методы определения контракционной усадки ВЦБ	207
7.1.3. Влияние факторов на контракционную усадку бетона	210
7.1.4. Способы снижения контракционной усадки ВЦБ	211
7.2. Пластическая усадка ВЦБ	212
7.2.1. Пластическая усадка и растрескивание ВЦБ	212
7.2.2. Плиточное устройство для испытания растрескивания при пластической усадке	214
7.2.3. Влияние факторов на растрескивание ВЦБ от пластической усадки	215
7.3. Факторы, влияющие на раннее растрескивание ВЦБ от усадки, и меры регулирования.....	222
7.3.1. Методы испытания и модель для анализа раннего растрескивания ВЦБ от усадки	222
7.3.2. Сравнение свойств усадки ВЦБ с простым бетоном	227
7.3.3. Факторы растрескивания ВЦБ от усадки	236
7.3.4. Меры по снижению растрескивания ВЦБ от усадки	248
Список литературы.....	258
ГЛАВА 8. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВЦБ	260
8.1. Методы определения морозостойкости бетона	260
8.1.1. Методы определения морозостойкости бетонов по стандарту США	260
8.1.2. Российские стандарты для определения морозостойкости бетонов	262

8.1.3. Английские стандарты для определения морозостойкости бетона	263
8.1.4. Китайские стандарты для определения морозостойкости бетона	264
8.1.5. Процесс деструкции бетона при совместном воздействии циклов замораживания-оттаивания и механических нагрузок	267
8.1.6. Защитные характеристики бетонов от разрушения под действием солей, используемых для стаивания снега и льда	270
8.2. Методы определения проницаемости бетона	272
8.2.1. Метод оценки проницаемости бетона по GBJ 82-85	273
8.2.2. Ускоренный метод «раствор-давление»	274
8.2.3. Стандартный метод определения устойчивости бетона к проникновению хлорид-ионов (ASTM C1202)	278
8.2.4. Ускоренный метод (NEL) для определения коэффициента диффузии хлорид-ионов	280
8.2.5. Ускоренный метод (RCM) для определения коэффициента диффузии хлорид-ионов	280
8.3. Метод определения стойкости бетона от реакции взаимодействия между щелочами в цементе и заполнителем	281
8.3.1. Метод вычисления содержания щелочи в объеме бетона	281
8.3.2. Методы оценки эффективности снижения реакции взаимодействия между щелочами в цементе и заполнителем	291
Приложение А. Метод определения эффективности сдерживания реакции ASR при введении минеральных добавок	301
8.4. Антикоррозионные свойства бетона, работающего в условиях воздействия сульфатов	305
8.4.1. Основные положения теории агрессивного воздействия сульфатов на материалы на основе цемента	305
8.4.2. Методы определения коррозионной стойкости материалов на основе цемента в условиях воздействия сульфатных сред	309
8.4.3. Коррозионная стойкость материалов на основе цемента, эксплуатирующихся в условиях воздействия сульфатных сред и низких температур	319
8.5. Методы исследования коррозионной стойкости арматурных стале.....	335
8.5.1. Электрохимические методы исследования	335
8.5.2. Методы анализа проникновения хлорид-ионов в бетон	339
8.6. Стойкость бетона при карбонизации	345
8.6.1. Карбонизация бетона и ее опасность	345
8.6.2. Основные факторы, влияющие на карбонизацию бетона	347
8.6.3. Меры улучшения стойкости бетонов к карбонизации	348
Список литературы	349
ГЛАВА 9. ДВА ВОПРОСА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОЦЕНКЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЦБ	352
9.1. Масштабный коэффициент для оценки предела прочности при сжатии кубических образцов ВЦБ.....	352
9.1.1. Масштабный коэффициент для бетонов с классами прочности при сжатии С70 и С80	354
9.2. Анализ факторов, влияющих на результаты испытаний прочности кубических образцов ВЦБ при сжатии.....	358
9.2.1. Влияние скорости нагружения образцов	358
9.2.2. Влияние условий хранения образцов	359

9.2.3. Влияние прижимной пластины	360
9.2.4. Требования, предъявляемые к формам для изготовления образцов.....	361
9.2.5. Влияние влажности поверхности образцов	361
9.3. Анализ хрупкость ВЦБ при разрушении	363
Список литературы.....	366
ГЛАВА 10. ГИДРАТАЦИЯ И МИКРОСТРУКТУРА ВЦБ.....	367
10.1. Гидратация и микроструктура двойной системы вяжущих веществ «ДГШ–цемент».....	367
10.1.1. Влияние ДГШ на физико-механические свойства вяжущих систем.....	367
10.1.2. Метод определения химически связанной воды и степени гидратации цемента.....	369
10.1.3. Анализ продуктов гидратации	370
10.2. Теория гидратации и твердения системы тройной системы вяжущих веществ «ДГШ–МК–цемент».....	373
10.2.1. Анализ продуктов гидратации	375
10.2.2. Микроструктура растворов вяжущих веществ.....	376
10.3. Влияние зол на продукты гидратации цемента.....	379
10.3.1. Виды продуктов гидратации	379
10.3.2. Влияние зол на продукты гидратации.....	381
10.4. Влияние минеральных добавок на поровую структуру бетона и цементного камня.....	384
10.4.1. Общая пористость	384
10.4.2. Распределение пор по размерам	385
Список литературы.....	387
ЧАСТЬ 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЦБ.....	388
ГЛАВА 11. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЦБ.....	388
11.1. Методы проектирования состава ВЦБ.....	388
11.2. Результаты исследований ДГШ–МК–ВЦБ.....	392
11.2.1. Прочностные характеристики ДГШ–МК–ВЦБ	392
11.2.2. Реологические характеристики смесей МК–ДГШ–ВЦБ	396
11.2.3. Долговечность ДГШ–МК–ВЦБ	397
11.3. Результаты исследований золо-ВЦБ.....	405
11.3.1. Изготовление золо-ВЦБ и их прочностные характеристики	405
11.3.2. Подвижность золо-ВЦБ	409
11.3.3. Контракционная усадка золо-ВЦБ.....	409
11.3.4. Устойчивость золо-ВЦБ к проникновению ионов хлора	411
11.3.5. Коррозионная стойкость золо-ВЦБ	412
Список литературы.....	413
ГЛАВА 12. УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ СО СРЕДНИМ КЛАССОМ ПРОЧНОСТИ.....	414
12.1. Воздействие ДГШ и зол на улучшение характеристик бетонов со средним классом прочности.....	416
12.1.1. Влияние раздельного и совместного введения ДГШ и золы на прочность бетона.....	416
12.1.2. Влияние содержания ДГШ и золы на подвижность бетона со средним классом прочности.....	426

12.1.3. Влияние ДГШ и зол на нарастание температуры при изготовлении массивных бетонных конструкций.....	438
12.1.4. Влияние ДГШ на проницаемость бетона.....	440
12.2. Улучшение характеристик бетона со средним классом прочности С30~С50	441
12.2.1. Изготовление ВЦБ со средним классом прочности.....	442
12.2.2. Анализ себестоимости материалов с улучшенными рабочими характеристиками для бетонов со средним классом прочности.....	445
Список литературы.....	448

ВВЕДЕНИЕ

В начале 90-х гг. XX века впервые был создан высококачественный цементный бетон (далее: ВЦБ) с улучшенными свойствами. Хотя на тот момент он еще не имел окончательного наименования, было ясно, что он гарантирует значительную долговечность бетонным конструкциям. ВЦБ с улучшенными свойствами – это новый тип бетона, обладающий более высокими характеристиками для различных областей применения и соответствующий требованиям современных технологий.

У ВЦБ, изготовленных с использованием высококачественных химических и минеральных добавок, улучшается подвижность, снижается водоцементное отношение, сохраняется осадка конуса (ОК), повышается плотность и водонепроницаемость. Благодаря более высокому качеству протекания реакций гидратации вяжущих веществ, улучшается микроструктура, уменьшается внутренняя пористость бетона и повышается его долговечность. При производстве ВЦБ значительно сокращаются энергозатраты и расходы на сырьевые материалы, облегчаются формы охраны труда и защиты окружающей среды. Подобные исследования проводятся как в Китае, так и за рубежом, что подтверждает их актуальность.

В нашей стране и за рубежом проводятся активные научные исследования ВЦБ в связи с высокими показателями качества бетона нового вида и его высокой технологичности. Однако решение поставленной задачи еще далеко от своего завершения.

Для практического внедрения ВЦБ в производство необходимо разработать совершенные методы, позволяющие эффективно использовать научные теории получения цементных бетонов с улучшенными свойствами в соответствии с руководством по рациональному анализу и улучшению использования ВЦБ, а также для того, чтобы избежать образования дефектов и достичь высокой общей эффективности строительства.

Ведущими организациями (Университеты Синхуа, Ухай Лигун, Тунци, Нанкин, Китайская гидроэлектрическая академия и т.д.) проведены научные исследования на темы: «Комплексное исследование и применение ВЦБ» и «Исследование и применение ВЦБ новых типов». Проведены длительные комплексные макро- и микроскопические исследования ВЦБ на основе природного и техногенного сырья Дальнего Востока, что позволило получить результаты, представляющие значительный интерес.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Книга состоит из пяти частей:

Первая часть: Сырье для ВЦБ.

Подробно анализируется влияние наиболее часто используемых для производства материалов (цемент, минеральные наполнители, заполнители и химические добавки) на свойства ВЦБ, а также технические требования к примененным материалам и т.д.

Основные особенности:

1. Минеральные наполнители: мелкомолотые шлаки, зола-унос, микрокремнезем и мелкомолотый природный цеолит – четыре основных вида минеральных наполнителей с точно определенными параметрами, требования к которым приведены в государственном стандарте GB/T 18736 «Минеральные добавки для высокопрочного ВЦБ».

2. Заполнители: проведены всесторонние и систематические исследования методов испытания заполнителей на активность их взаимодействия со щелочами цемента, проведенные в административных районах Пекин, Тяньцзинь и Тангу. Составлена карта расположения безопасных заполнителей, распространенных в этих районах, с учетом их щелочной активности, что позволяет предотвратить ущерб от реакции между щелочами в цементе и заполнителем.

3. Совместимость цемента и добавок: приводятся результаты углубленных исследований влияния цемента, химических и минеральных добавок на их совместимость, а также анализ себестоимости разработанных бетонов.

Вторая часть: Свойства ВЦБ.

Изучена подвижность свежееуложенной бетонной смеси и характеристики затвердевшего ВЦБ на основе различных методов контроля и оценки; рассмотрены меры, позволяющие повысить эффективность производства ВЦБ.

Научная новизна работы:

1. Исследованы реологические свойства вяжущих веществ.

2. Разработаны методы, способствующие уменьшению содержания щелочи на 1 куб бетона и обеспечивающие эффективность введения минеральных добавок за счет регулирования реакции взаимодействия между щелочами цемента и заполнителем.

3. Проведены комплексные исследования минеральных добавок на сульфатостойкость бетонов методом «бетонной призмы», а также многочисленные исследования параметров протекания сульфатной коррозии в условиях низких температур.

4. Выполнены исследования влияния факторов на равномерность изменения объема и раннее растрескивание ВЦБ от усадки.

5. Выявлены причины разрушения ВЦБ.

Третья часть: Проектирование составов ВЦБ.

Разработка метода проектирования составов ВЦБ со средней и повышенной прочностью, самоуплотняющегося бетона, ВЦБ на основе цементов разных

марок и т.д.; приведены результаты исследования их свойств и факторов влияния. Получены результаты исследований, имеющих практическое значение, позволяющие получать бетоны высокой прочностью, а также расширять сырьевую базу для более активного внедрения высококачественных бетонов.

Существуют два пункта, на которые читатель должен обратить особое внимание:

1. В последние годы в производстве бетонов происходит достаточно быстрое внедрение новых технологий, некоторые термины еще не фиксированы, нет их стандартизации, например: шлаки, зола, микрокремнезем, «смесь», «примесь», «гибридный материал», «минеральные добавки» и т.д. В соответствии со стандартом GB/T 18736 и наметившимся устойчивым употреблением данных терминов во всем мире, добавки для ВЦБ, используемые, в основном, для повышения долговечности бетона, называют «минеральные добавки».

2. Авторы занимаются исследованием высокопрочных бетонов с 1995 года, поэтому часть исследований проведена по стандартам, совпадающим со стандартами ИСО, внедренными в 1999 году, а часть – по старым стандартам. Анализ цемента в соответствии с новыми принятыми стандартами уровня прочности (классы прочности – 32.5, 42.5 и т.д.) показал, что результаты, полученные с помощью этих двух наборов стандартных методов испытаний, значительно отличаются друг от друга по прочности и активности.

В книге сохранены оригинальные результаты исследования активности вяжущих. Старые стандарты используются для анализа химического состава цементов, новые – для определения класса прочности. Авторы приносят свои извинения за это очевидное неудобство для читателей.

Авторы обобщили в книге результаты своих исследований для обмена технической информацией, возможности общения и обсуждения данной работы с коллегами. От уровня квалификации персонала, его опыта и технических навыков во многом зависело содержание этой книги, а за все возможные упущения и ошибки авторы заранее просят прощения у читателей и будут признательны всем за советы и исправления.

ЧАСТЬ I. СЫРЬЕ ДЛЯ ВЦБ

При производстве ВЦБ используются традиционные материалы: четыре основных компонента – цемент, песок, щебень и вода, а также химические (пятый компонент) и минеральные (шестой компонент) добавки. Использование суперпластификаторов нового типа и тонкомолотых минеральных веществ составляет основу технологии получения высококачественного бетона. Первые позволяют значительно снизить водоцементное отношение, увеличить осадку конуса бетонной смеси и ее пластичность, достигая высокой плотности и хорошей подвижности. Вторые способствуют уменьшению объема микропор в цементном камне, участвуют в процессе гидратации вяжущих, что сопровождается увеличением прочности и долговечности бетона.

В связи с повышенными требованиями к эффективности и свойствам ВЦБ, сырьевые материалы, применяемые для его получения, должны соответствовать более высоким критериям качества по сравнению с материалами для обычного бетона. Поэтому требования к используемым сырьевым материалам для ВЦБ и обычного бетона различны. Ниже приведено описание материалов для получения ВЦБ.

ГЛАВА 1. ЦЕМЕНТ

1.1. Классификация и свойства китайских цементов

Цемент – вяжущее вещество, являющееся главным компонентом при производстве бетона и ВЦБ, в частности. Цемент непосредственно влияет на свойства и стоимость бетона. В Китае существует большое количество видов цемента, которые можно классифицировать по способу производства, минеральному составу и области применения (см. таблицу 1.1).

Реализованы новые технологии производства цементов, такие как сырьевая и предварительная гомогенизация, а также осуществлено совершенствование оборудования для сушки и измельчения. Появление печей обжига для сухого способа (печи с подогревом или печи с циклонным теплообменником и декарбонизатором) позволило не только значительно снизить потребление энергии и существенно увеличить производительность, но и улучшить качество клинкера по сравнению с клинкером, произведенным мокрым способом. Этот тип печей способствовал развитию цементной промышленности во всем мире. В настоящее время практически на всех крупных заводах Китая применяются новые модели печей для обжига по сухому способу.

Таблица 1.1

Классификация китайских цемента

Признак классификации	Наименование	Описание
По свойствам и области применения	Портландцемент	Цементы общестроительного назначения: портландцемент, портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент, золопортландцемент и т.д.
	Специальный цемент	Тампонажный цемент, умереннотермичный портландцемент, низкотермичный шлакопортландцемент, цемент для кладочных растворов и т.д.
	Особый цемент	Быстротвердеющий портландцемент, расширяющийся цемент, сульфатостойкий цемент и т.д.
По способу производства (подготовки сырья)	Мокрый способ	«Мокрым» этот способ назван потому, что измельчение сырьевой смеси происходит в водной среде. На выходе получается шихта в виде водной суспензии – шлама. Далее шлам поступает в печь для обжига – вращающуюся печь. Мокрый способ требует больше топлива для обжига, но расход электроэнергии ниже; сырье легко гомогенизируется; улучшается качество клинкера и уменьшается пылеобразование. Этот способ получил свое развитие в 30-х гг. XX века.
	Комбинированный способ	Сырьевая смесь (шихта), поступающая в печь, имеет меньшую влажность по сравнению с «мокрым» способом.
	Сухой способ	Сухой способ заключается в том, что сырьевые материалы перед помолом или в его процессе высушиваются, а затем закладываются в печь для обжига.
По способу производства (обжига клинкера)	Шахтная печь	Шахтная печь применяется на небольших заводах.
	Вращающаяся печь	Печь обжига для мокрого способа.
		Печь обжига «Либор».
		Печь обжига нового типа по сухому способу (печи с подогревателем или печи с циклонным теплообменником и декарбонизатором).
По минеральному составу	Портландцемент, глиноземистый цемент, сульфоалюминатный портландцемент, аритоалюминатный портландцемент, сульфферритный портландцемент, безклинкерный цемент и т.д.	

1.2. Виды цементов

При изготовлении ВЦБ, как правило, используют портландцемент или портландцемент с минеральными добавками. В особых случаях применяют другие виды цемента. При выборе цемента с минеральными добавками необходимо знать вид, тонкость помола и содержание добавок в цементе. При проектировании ВЦБ необходимо определить удельное содержание минеральных добавок и на основе комплексных испытаний определить их эффективность.

1.2.1. Портландцемент

Портландцемент (ПЦ) – вяжущее вещество, обладающее гидравлическими свойствами, состоящее из молотого портландцементного клинкера, известняка, до 5% доменного шлака и гипса. Обычно выделяют два вида портландцемента: тип I – без минеральных добавок (обозначается Р.І); тип II – цемент, в который при помоле добавляют известняк или гранулированный доменный шлак, суммарная масса которых не превышает 5% от массы цемента (обозначается Р.ІІ). Цемент Р.ІІ широко используется при производстве различных бетонных или железобетонных конструкций.

1.2.2. Портландцемент с минеральными добавками

Портландцемент, обозначаемый Р.О, получают путем совместного помола силикатного цементного клинкера, минеральных добавок (6 ÷ 15%) и гипса. В соответствии с национальным стандартом (GB 175) цемент может содержать активные минеральные материалы в количестве не более 15% от массы цемента, например, сажи – до 5%, инертных минеральных веществ – до 10% от массы цемента. Инертные минеральные добавки широко используются при изготовлении различных бетонных или железобетонных конструкций.

1.2.3. Шлакопортландцемент

Шлакопортландцемент (ШПЦ) – гидравлическое вяжущее вещество, продукт совместного помола портландцементного клинкера, гранулированных доменных шлаков и гипса (обозначается Р.С). Шлакопортландцемент содержит гранулированные доменные шлаки в количестве 20 ÷ 50% от общей массы цемента. Также разрешается использование одного вида минеральных добавок – известняка, сажи, зол-уноса или пуццолановых добавок взамен цемента, но не более 8% от его общей массы. При этом количество гранулированного доменного шлака должно быть не менее 20% от общей массы цемента. ШПЦ характеризуется низким тепловыделением при твердении, высокой стойкостью к сульфатной коррозии, повышенной жаропрочностью и т.д. К недостаткам ШПЦ следует отнести более высокую, чем у ПЦ нормальную густоту цементного теста, замедленную скорость твердения в ранние сроки, большую водопотребность, пониженную морозостойкость, более высокие усадочные деформации при высушивании, низкую раннюю прочность (в позднем возрасте проч-

ность нарастает более интенсивно). Основные области применения ШПЦ – подземные и подводные конструкции.

1.2.4. Пуццолановый портландцемент

Пуццолановый портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, продукт совместного помола портландцементного клинкера, активной минеральной пуццолановой добавки и гипса (обозначается Р.Р). В соответствии с положениями национального стандарта GB 1344, содержание пуццолановой добавки должно быть в пределах 20 ÷ 50% от массы цемента. Обычно используются следующие пуццолановые добавки: пуццолан, туф, трепел, обожженный сланец, обожженная глина, диатомит и т.д. Используемые материалы должны соответствовать GB/T 2847. Пуццолановые портландцементы характеризуются низким тепловыделением при гидратации, лучшей сульфатостойкостью, но повышенной нормальной плотностью цементного теста, замедленной скоростью твердения в ранние сроки, пониженной морозостойкостью, повышенными усадочными деформациями при высушивании, низкой ранней прочностью (в позднем возрасте прочность нарастает более интенсивно). Основные области применения пуццолановых портландцементов – подземные и подводные конструкции, а также конструкции, эксплуатируемые во влажностных условиях.

1.2.5. Золопортландцемент

Золопортландцемент (далее ЗПЦ) – вяжущее вещество, твердеющее в воде, получаемое путем совместного тонкого измельчения портландцементного клинкера, золы-уноса и гипса (обозначается Р.Ф). В соответствии с GB1344 данный цемент должен содержать золу-уноса в количестве 20 ÷ 40% от массы цемента.

Зола-уноса должна соответствовать требованиям GB/T 1596. ЗПЦ характеризуется пониженной нормальной плотностью цементного теста, пониженными усадочными деформациями при высушивании, лучшей трещиностойкостью, низким тепловыделением при гидратации, поэтому основные области применения ЗПЦ – подводные, подземные конструкции, гидротехническое строительство и т.д.

1.2.6. Композиционный портландцемент

Композиционный портландцемент (обозначается Р.С) – вяжущее вещество, твердеющее в воде, получаемое путем совместного помола портландцементного клинкера, двух или более активных компонентов и гипса. В соответствии с GB 12958 содержание активных компонентов должно быть не менее 15% от общей массы цемента, но не более 50%. Разрешается замена сажей до 8% активных компонентов. Широкое внедрение композиционных портландцементов в промышленном и гражданском строительстве Китайской народной республи-

ки является одним из главных направлений улучшения качества зданий и сооружений.

1.3. Физические свойства цемента и его влияние на ВЦБ

1.3.1. Плотность и объемный вес портландцемента

Плотность портландцемента – масса единицы объема вещества в абсолютном плотном состоянии без учета объема пор и пустот. Плотность портландцемента зависит в основном от минерального состава клинкера, степени обжига клинкера и т.д. Плотность обычного цемента, шлакопортландцемента, пуццоланового портландцемента, золопортландцемента, композиционного портландцемента и др. зависит не только от качества клинкера, но и от количества и плотности добавок. Объемный вес портландцемента – отношение массы зернистого или порошкообразного материала к объему в рыхло-насыпном состоянии, вместе с порами и пустотами. Плотность и объемный вес различных портландцементов приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Плотность и объемный вес различных портландцементов

Наименование цемента	Плотность, г/см³	Объемный вес, г/л
Портландцемент	3.1 ÷ 3.2	
Портландцемент с минеральными добавками	3.05 ÷ 3.2	900 ÷ 1300
Шлакопортландцемент	3.0 ÷ 3.1	
Пуццолановый портландцемент, портландцемент с минеральной добавкой – золой	2.7 ÷ 3.1	800 ÷ 1000

1.3.2. Тонкость помола

Тонкость помола является одним из важнейших показателей при контроле качества цемента. Тонкость помола влияет на скорость схватывания и твердения, прочность, водопотребность, усадку, тепловыделение и т.д. Частица цемента размером менее 40 мкм имеет более высокую активность, а частицы размером более 90 мкм почти инертны и практически выступают в роли заполнителя, поэтому необходимо контролировать тонкость помола. Чем тоньше помол цемента, тем быстрее происходит схватывание, быстрее нарастает ранняя прочность, уменьшается водоотделение. Однако помол не должен быть слишком тонким, так как происходит увеличение водопотребности, усадки и тепловыделения, а также значительно сокращается производительность мельницы и увеличивается потребление энергии. Высокая тонкость помола цемента у ВЦБ может привести к раннему трещинообразованию бетона и уменьшению эффективности добавок.

Определение тонкости помола цемента устанавливается тремя способами: по остатку на сите, по удельной поверхности, по гранулометрическому составу цемента. В Китае существует шесть общих стандартов, учрежденных для цементной промышленности, предусматривающих определение тонкости помола по остатку на сите. Исключение составляет портландцемент, тонкость помола которого определяется по удельной поверхности. Для цемента, как порошкообразного материала, характерно наличие частиц различного размера. С целью совершенствования технологии производства, полного использования клинкера, важно добиться оптимального зернового состава цемента. Частицы размером от 3 до 32 мкм играют основную роль в повышении прочности цементного камня [1], их общее количество должно быть не менее 65%, а содержание частиц размером менее 3 мкм не должно превышать 10%.

Наиболее простым и быстрым способом анализа размеров частиц является просеивание через сита, но наименьшее стандартное сито содержит не более 400 ячеек сетки размером 38 мкм. Это обстоятельство, а также явление конгломерации не позволяет исследовать ультратонкие порошки с размером зерен менее 10 мкм. К настоящему времени доступны более совершенные методы анализа: седиментационный, лазерный, ВЕТ и т.д. Метод лазерного анализа позволяет исследовать распределение частиц в диапазоне размеров $0.05 \div 3000$ мкм, обладает высокой степенью автоматизации, отличается простотой операций, высокой скоростью измерений, хорошей воспроизводимостью результатов, что обусловило широкое его применение для контроля и анализа гранулометрического состава цемента и добавок [2].

Влияние тонкости помола цемента и добавок подробно изложено в параграфе 5.5.

1.3.3. Водопотребность

Вода в составе бетонной смеси выполняет две функции. Первая связана с участием в реакциях гидратации цемента, обеспечении схватывания и твердения бетона, а вторая функция – с приданием бетонной смеси подвижности для достижения требуемой удобоукладываемости. Первоначальное количество воды подразделяется на воду, принявшую участие в реакции гидратации цемента, и воду, находящуюся в различных термодинамических состояниях в порах и капиллярах цементного камня. Избыточная вода образует поры, которые ухудшают не только характеристики бетона, но и его внешний вид, снижают прочность и долговечность.

Нормальная густота – водоцементное отношение в процентах, при котором достигается нормированная консистенция цементного теста. Нормальную густоту цементного теста характеризуют количеством добавленной воды, выраженным в процентах от массы цемента. Нормальная густота цемента зависит от минерального состава клинкера, тонкости помола, вида и количества минеральных добавок в цементе.

1.3.4. Сроки схватывания

Процесс твердения цементного теста состоит из двух этапов: начала и конца схватывания. Начало схватывания определяется промежутком времени с момента затворения вяжущего водой до момента потери пластичности цементного теста, а конец схватывания характеризуется временем от момента затворения вяжущего до набора смесью некоторой начальной прочности.

Если схватывание происходит слишком быстро, то очень сложно успеть доставить до места, уложить и уплотнить цементные смеси до начала твердения. Они теряют подвижность, поэтому при укладке и уплотнении нарушается первоначально сформировавшаяся структура цементного камня, что, в результате, приводит к снижению прочности бетона. Стандарт КНР регламентирует для шести видов цемента (портландцемента, портландцемента с минеральными добавками, шлакопортландцемента, пуццоланового портландцемента, золопортландцемента и композиционного цемента) начало схватывания, которое должно наступать не ранее 45 минут, а конец схватывания – не позднее 6,5 часов с момента затворения. У остальных цементах конец схватывания – не позднее 10 часов.

При высокой температуре в цементной мельнице гипс теряет воду и образуется полуводный гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) или растворимый ангидрит, что может привести к ложному схватыванию цемента. Очень быстрое схватывание цемента может быть следствием высокого содержания C_3A , отсутствия или недостатка гипса, большого содержания щелочей, недостаточного обжига клинкера или чрезмерно высокого содержания свободного оксида кальция ($f\text{-CaO}$) в клинкере.

1.3.5. Равномерность изменения объема цемента

Равномерность изменения объема цемента – явление, связанное с деформациями цементного теста в процессе его твердения.

При гидратации цемента общий объем системы обычно изменяется. Если указанные изменения являются равномерными или происходят в течение схватывания и твердения цемента, то они не оказывают негативного влияния на качество изделий и конструкций. Если изменения объема наблюдаются после затвердевания цементного бетона, что происходит из-за наличия каких-либо вредных компонентов в цементе, то это сопровождается возникновением внутренних разрушающих напряжений в бетоне, которые приводят к снижению прочности бетонных и железобетонных конструкций, трещинообразованию и даже серьезным авариям. Поэтому равномерность изменения объема цемента является важным показателем его качества. В таблице 1.3 приведены основные факторы, обуславливающие неравномерность изменения объема у наиболее широко используемых портландцементов для ВЦБ. В силу того, что у трех минеральных компонентов цемента, оказывающих наибольшее влияние на равномерность изменения объема цемента, различные скорости гидратации, существуют и различные методы испытаний, которые представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Методы определения равномерности изменения объема цемента

Факторы	Методы определения	Регламентирующие стандарты	Принципы и критерии методов
1	2	3	4
Содержание свободного оксида кальция (f-CaO) в клинкере	Метод определения равномерности изменения объема цемента	GB/T 1346 «Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема цементного теста»	Испытывают образцы в виде лепешек. Если на лицевой стороне лепешек не обнаружено трещин, видимых невооруженным глазом, проверяется прямолинейность при помощи стальной линейки. Если не обнаружено кривизны, то цемент признается прошедшим испытание
Содержание периклаза (MgO) в клинкере	Метод определения равномерности изменения объема цемента при пропаривании.	GB/T 750 «Метод испытания цемента на неизменность объема при пропаривании»	Принципиальное отличие данного метода заключается в том, что испытание образцов проводится в среде насыщенного водяного пара. Испытание по определению равномерности изменения объема цемента при воздействии пара и давления производится на образцах размером 25 × 25 × 250 мм. Для того, чтобы периклаз в цементе быстро гидратировал, увеличивают температуру (215,7° С) и давление (2 МПа). Набухание при воздействии пара и давления для портландцемента с минеральными добавками, шлакопортландцемента, пуццоланового портландцемента, золопортландцемента не должно превышать 0,5 %, а портландцемента – не более 0,8 %.

продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4
<p>Содержание гипса (в пересчете на SO₃) в цементе</p>	<p>Определение содержания SO₃, оставшегося в мелкозернистом бетоне после гидратации в течение 24ч.: содержание SO₃, (г/л) в жидкости, выделенной из мелкозернистого бетона в расчете на единицу объема</p>	<p>ИС/Т 668 «Метод определения содержания CaSO₄ в мелкозернистом бетоне после гидратации»</p>	<p>В результате взаимодействия гипса с продуктами гидратации C₃A образуется гидросульфатоалюминат кальция (3CaO•Al₂O₃•3CaSO₄•(30 ÷ 32)H₂O или AFt). В результате данной реакции объем твердой фазы увеличивается в 2,22 раза. При наличии чрезмерного количества гипса в цементе структура бетона может разрушиться из-за локального набухания. Сущность метода: исследуется мелкозернистый бетон состава – цемент 500 г, стандартный песок 1375 г, дистиллированная вода 250 мл. Образцы твердеют в воде при температуре 23 ± 0,5 °С в течение 24 ч. ± 15 мин. Содержание SO₃ определяется из анализа специально подготовленной диализированной жидкости из цементного раствора. У портландцемента, портландцемента с минеральными добавками, пуццоланового портландцемента, золопортландцемента и композиционного портландцемента содержание SO₃ не должно превышать 3,5%, а у шлакопортландцемента – 4 %.</p>

1.3.6. Классы прочности

Образцы цемента должны быть испытаны в соответствии со стандартными методиками. GB/T 17671 устанавливает метод определения пределов прочности при сжатии и изгибе в возрасте 3 и 28 суток. Классификация видов цемента по прочности представлена в таблице 1.4.

Классы прочности цемента

Виды цемента	Определенные стандарты	Классы прочности
Портландцемент	GB 175	42.5, 42.5R, 52.5, 52.5R, 62.5, 62.5R
Портландцемент с минеральными добавками	GB 175	32.5, 32.5R, 42.5, 42.5R, 52.5, 52.5R
Шлакопортландцемент	GB 1344	32.5, 32.5R, 42.5, 42.5R, 52.5, 52.5R
Пуццолановый портландцемент	GB 1344	32.5, 32.5R, 42.5, 42.5R, 52.5, 52.5R
Золoportландцемент	GB 1344	32.5, 32.5R, 42.5, 42.5R, 5.25, 52.5R
Композиционный портландцемент	GB 12958	32.5, 32.5R, 42.5, 42.5R, 52.5, 52.5R

В последние годы практика строительства показала, что после замены в 1999 году стандарта на методы испытании цемента на прочность, стало очевидным существенное изменение качества цемента в нашей стране за счет увеличения тонкости помола и удельной поверхности в целях обеспечения ранней и поздней прочности. Увеличение тонкости помола для повышения прочностных характеристик оказывает влияние и на другие свойства бетона.

1.3.7. Тепловыделение цемента

Тепловыделение цемента – количество теплоты, выделяемое при гидратации цемента (Дж/г). На тепловыделение цемента влияет множество факторов, в том числе минеральный состав клинкера, тонкость помола цемента, содержание и качество минеральных добавок, водоцементное отношение (В/Ц), температура хранения образцов и т.д. Но главным образом тепловыделение обуславливается составом и содержанием клинкера. Для уменьшения тепловыделения, как правило, уменьшают содержание C_3A в цементе.

Существует несколько методов определения тепловыделения, отличающихся продолжительностью испытаний, методами теплопереноса, применяемыми приборами и т.д. В целом, можно выделить (таблица 1.5): прямой (или метод регенерирования) и косвенный методы (или метод теплорастворения).

При изготовлении ВЦБ используется большое количество вяжущего вещества, поэтому регулирование тепловыделения цемента и вяжущих веществ имеет большое значение для строительства с большим объемом бетонирования. Благодаря очень низкой теплопроводности бетона, при гидратации вяжущих

- экономия ресурсов и энергии – использование больших количеств промышленных отходов позволит уменьшить расход цемента и потребление энергии на его производство, снизить загрязнение окружающей среды и улучшить экологию;
- хорошая подвижность – удобная укладка составов, улучшение условий труда и снижение шумового загрязнения.

Разработанные бетоны со средним классом прочности, обладающие улучшенными эксплуатационными свойствами, значительно превосходят традиционные бетоны по техническим характеристикам, а также имеют большое значение для экономии энергии, материалов, охраны труда и окружающей среды и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 王玲, 贾祥道, 阎晓晋等. 磨细矿渣对HPC工作性和强度的改善作用. 姚燕主编. 新型高性能混凝土耐久性的研究和工程应用. 中国建材工业出版社, 北京, 2004.1, P301~306.
2. 中国建筑材料科学研究院. 国家‘十五’重点科技攻关项目‘新型高性能混凝土及其耐久性的研究’第三课题第一专题‘新型高性能矿渣混凝土的研究和应用’研究报告, P77~107.

Юай Юань

Ван Лин

Тянь Пе

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЙ ЦЕМЕНТНЫЙ БЕТОН С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Перевод на русский язык *Го Ли*
Научный редактор *Т.А. Низина*

Редактор *В.П. Бурмакин*
Компьютерная верстка *В.П. Бурмакин*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Подписано к печати 11.11.2013.
Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. 28,0 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации оф. 511
тел., факс: (499) 183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru>