

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Якимович Г.Д., магистр техн. наук (БНТУ)

Аннотация. Данная статья посвящена критическому анализу существующей технологии сухого формования бетона, в изучении возможностей сухого формования в решении проблемы более плотной укладки сухой бетонной смеси, а также нейтрализации негативных эффектов при водонасыщении и формовании смеси. Это позволяет усовершенствовать метод сухого формования с целью внедрения новой, более экономичной технологии в производство мелкоштучных изделий из мелкозернистого бетона.

Мелкозернистый бетон обладает целым рядом преимуществ по сравнению с бетоном на крупном заполнителе, и именно его применение целесообразно в технологии сухого формования. Как правило, мелкозернистый бетон имеет более высокие физико-механические характеристики, а также большую долговечность по сравнению с тяжелым бетоном. Уменьшение диаметра пор и капилляров, характерное для мелкозернистых бетонов, повышение однородности их распределения обуславливают повышенную морозостойкость материала и, в конечном счете, его долговечность. Это позволяет снизить материалоемкость конструкций и повысить надёжность их эксплуатации. Ускоренная кинетика твердения изделий из особо жестких смесей сокращает длительность тепловлажностной обработки. Стоимость же изделий из мелкозернистого бетона может быть снижена на 25-50% по сравнению с крупнозернистым.

Однако производство изделий из мелкозернистого бетона сопряжено с большим расходом вяжущего, что влечёт за собой значительное удорожание изделия при относительно низких классах по прочности. Необходимо совершенствование способа формования изделий из мелкозернистых бетонных смесей. В качестве перспективного направления в проводимом нами исследовании было выбрано сухое формование бетонной смеси. Данный метод обладает рядом преимуществ.

Сухое формование в сочетании с вакуумированием позволяет получать бетоны с низким водоцементным отношением, порядка 0,27-0,28. При этом укладка и уплотнение легко формуемой сухой бетонной смеси непосредственно до её водонасыщения позволяет избежать традиционных проблем уплотнения жёстких смесей. Применение сухих смесей практически не ограничено временем транспортирования и хранения, они инертны к изменениям температуры, допускают значительные перерывы и остановки при укладке в опалубку. Более плотная укладка зерен твердой фазы при вибрационном воздействии, чем при применении смеси аналогичного зернового и состава при влажном формовании, позволяет получить более плотную структуру, харак-

теризующуюся меньшей пористостью, что обеспечивает рост его плотности, прочности и эксплуатационных характеристик.

Одной из перспективных для мелкозернистого бетона является технология изготовления конструкций с использованием тонкомолотого комплексного вяжущего, представляющего собой результат совместного помола цемента с песком до удельной поверхности $450-550 \text{ м}^3/\text{кг}$. Данный приём позволяет как снизить расход цемента, так и существенно улучшить структурные характеристики материала, и сократить время тепловлажностной термообработки.

Во многих публикациях отмечается важность использования качественных песков с хорошо подобранной гранулометрией. Исследованиями отечественных и зарубежных ученых показано, что от песка, как основного носителя площади поверхности, зависит, главным образом, расход цемента в бетоне. Из этого вытекает необходимость переработки природного песка.

В традиционных водозатворенных бетонных смесях вокруг зерен твердой фазы формируются сольватные оболочки разной толщины. При уплотнении бетона, происходит перегруппировка зерен твердой фазы в стремлении к более компактному взаиморасположению. Данный процесс ограничен толщиной водной прослойки между ними. Снижение водосодержания сопровождается уменьшением количества свободной жидкости до водоцементного отношения, равного $0,876$ от коэффициента нормальной густоты ($K_{нг}$). Однако, в данном случае, поверхностью твердой фазы цемента будет связана вся жидкость, и цементный гель становится трудноформуемой рыхлой массой.

Дальнейшее уменьшение содержания воды приводит к формированию на поверхности цементных зерен тонких слоев жидкости, поляризованные молекулы которой ориентированы в силовом поле частиц. Наличие в бетоне заполнителей, в особенности мелкого, обладающего развитой удельной поверхностью, усиливает проявление деструктивного эффекта при водосодержании бетона значительно превышающем водоцементное отношение $0,22-0,25$.

Наиболее распространённым способом формования блоков из мелкозернистого бетона на заводах ЖБК является полусухое вибропрессование. Технологический процесс подразумевает формование бетонного изделия в специальной пресс-форме при одновременном воздействии вибрации и давления. Для изготовления изделий методом полусухого вибропрессования применяются бетоны с низким водоцементным отношением.

Однако при водонасыщении смеси проявляется деструктивное влияние расклинивающего эффекта тонких плёнок воды, образующихся при смачивании зоны контакта частиц. При этом развивается внутреннее напряжение, равное давлению $0,004 \text{ МПа}$. Этот эффект проявляется в росте количества поглощаемой воды, а соответственно, и пористости бетона.

Одно из решений проблемы – совмещение технологий вибропрессования и вакуумирования. Однако данная технология оказалась сложно реализуемой на практике и показала свою экономическую неэффективность. Следующее решение – выдержка изделия в форме до набора прочности, при которой бетон может выдержать внутренние напряжения. Но данный метод лишает тех-

нологию её главного преимущества – малого времени оборачиваемости форм и повышает металлоёмкость производства.

С учётом вышеизложенного предлагается третье решение: использование технологии сухого формования с созданием в теле изделия пониженного давления и последующим водонасыщением, в результате чего обжимающее усилие будет создаваться непосредственно атмосферой. Сухая смесь обладает лучшей удобоукладываемостью, чем увлажнённая, что позволяет производить качественную укладку бетонных смесей, имеющих сверхнизкое водосодержание.

При реализации предложения необходимо учесть следующие проблемы:

1. Насыщение центральной части изделия водой. В качестве решения предлагается помещение в центральную часть пористых заполнителей, тем самым убирая саму необходимость насыщения данной зоны. Также заполнители будут являться «аккумуляторами» вакуума.

2. Ослабление внешних слоёв при вымывании цементного теста водой насыщения. Необходимо установление наличия самого явления, а также его масштабов, что позволит говорить о целесообразности и способах его устранения.

3. Обеспечение длительного поддержания разрежения в теле бетона. В качестве решения предлагается использование кольматирующих добавок.

В научно-исследовательской и испытательной лаборатории бетонов и строительных материалов были проведены эксперименты по совершенствованию технологии сухого формования.

Для формования образцов использовались следующие материалы: портландцемент М400 с нормальной плотностью 28 %; песок с модулем крупности 2,6. Для отработки технологии формования цемент и песок смешивались в соотношении 1,0:3,1. Кроме того, производилось формование образцов, ядро которых заменено зёрнами керамзита. В дальнейших исследованиях планируется применение составов с использованием молотого и керамзитового песков.

Расчет компонентов сухой бетонной смеси осуществлялся по методике профессора Э.И. Батяновского, скорректированной с учётом отсутствия в составе крупного заполнителя. Методика основывается на подборе такого соотношения сухих компонентов, которое обеспечит максимально плотную упаковку зерен твердой фазы в отформованной сухой смеси и бетоне.

Для формования образцов (кубов с ребром 70 мм) использовались перфорированные формы, на каждой грани которых размещается 36 отверстий диаметром 2 мм с шагом 1 см.

Влияние расклинивающего эффекта тонких плёнок воды нейтрализуется жёсткостью формы и воздействием прижимной пластины. Для предотвращения выхода раствора через отверстия и вымывания раствора из тела образца стенки формы изнутри покрыты слоем фильтровальной бумаги, которая также предотвращает сцепление раствора со стенками формы и разрушение образца при распалубке.

В ходе предварительных экспериментов было установлено оптимальное время вибрирования порядка 50 секунд. Дальнейшее вибрирование не приводит к заметному увеличению плотности смеси.

После укладки и уплотнения смеси с пригрузом на форму устанавливается прижимная пластина и происходит установка формы в вакуум-камеру. Вакуумный насос ВН-461М создаёт разрежение в системе и вакуумном баке. Ящик для насыщения, объёмом 16 литров, соединён с камерой посредством гибкого вакуумного шланга. Для контроля разрежения используется манометр.

После установки формы в ящик, устанавливается крышка с шлангом подачи воды и вакуумным шлангом, и включается насос. Благодаря эластичному покрытию на кромках ящика, происходит самофиксация крышки. Из соображений безопасности крышка дополнительно фиксируется болтами. Далее ящик переводится в вертикальное положение для подачи воды. Внутренний упор удерживает форму в верхней части ящика, в которой находится вакуумный шланг. Данное расположение позволяет избежать размывания образца струёй воды, подаваемой в ящик. По достижении давления 0,09 МПа насос выключается, и через шланг в ящик подаётся порядка восьми литров воды.

Затем система выдерживается под разрежением в течение 3 минут для деаэрации воды, если таковая не производилась заранее. При попадании воды в камеру с разрежением 0,09 МПа происходит её вскипание, образуется множество пузырьков воздуха, которые адсорбируются в отверстиях формы и препятствуют насыщению образцов, вызывая неравномерность насыщения либо полностью блокируя процесс насыщения.

После деаэрации ящик устанавливается в вертикальное положение, и давление поднимается на 0,01 МПа. При этом давление в ящике становится выше давления в теле бетона, что вызывает немедленный ток воды и насыщение образца. Насыщение длится в течение 30 секунд, после чего ящик возвращается в первоначальное положение.

Далее давление уравнивается с атмосферным, при этом происходит раскрытие крышки, и вода из ящика сливается. Ящик приводится в горизонтальное положение, снимаются страховочные болты и извлекается форма с образцом.

Образцы распалубливаются и выдерживаются в течение 24 часов в камере НВТ. Остальное время образцы выдерживаются в воде, чтобы восполнить недостаток в воде ядра образца.

В ходе исследований также изготавливались образцы из цементно-песчаного раствора сухого формования и из водозатворённой смеси.

Однако, проблема связи между слоями, довольно легко решаемая при уплотнении водозатворённого бетона, оказала катастрофический эффект при сухом формовании. Даже разрыхление поверхности слоя перед укладкой последующего не обеспечивает равномерной связи, а лишь смещает зону контакта. При распалубке уже насыщенного образца трещины раскрывались, тем самым полностью нейтрализуя эффект целостности наружной оболочки. Дальнейшее воздействие на образец приводит к его разделению на три части.

Снятие прижимной пластины, нейтрализующей эффект Ребиндера, вызывает мгновенное образование водной плёнки на границе контакта и разрушение образца. Для дальнейших экспериментов было принято уплотнение слоя 70 мм в течение 50 секунд.

Время насыщения образцов на заданную глубину устанавливалось по модели Э.И. Батяновского, скорректированной с учётом особенностей используемых форм. Часть воды неминуемо остаётся в пустотах форм, что вызывает поставку лишней воды при выравнивании давления с атмосферным. Окончательно принят следующий режим насыщения: подъём давления на 0,01 МПа в течение 20 с, насыщение 30 с, выравнивание с атмосферным давлением 30 с. При этом средняя глубина насыщения соответствовала расчётной 20 мм. Данные результаты использовались для разделения образца на ослабленную ненасыщенную зону (ядро) и более прочную и плотную зону насыщения.

В процессе насыщения водоцементное отношение бетона соответствовало значению 0,24. При этом происходило увеличение плотности образцов с 2130 кг/м³ до 2245 кг/м³. После выдерживания образцов в воде происходило полное насыщение образца, включая зону ядра, и В/Ц повышалось до 0,31-0,35, а средняя плотность до 2285 кг/м³. Предполагается, что введение технологии повторного вибрирования позволит осуществлять трёхслойную укладку бетонной смеси для получения плотностей выше 2300 кг/м³.

Динамика роста прочности бетона определялась разрушающим и неразрушающим (метод ударного импульса) методами контроля в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток. Полученные данные выявляют несоответствие прочности поверхностного слоя образца и прочности образца в целом. Так, прочность поверхностного слоя кубов, изготовленных методом сухого формования, в возрасте 28 суток соответствовала классу цемента, в то время, как прочность куба в целом оказалась на 30% ниже. Это позволяет судить о ядре образца как о самой слабой зоне. Для подтверждения данного предположения были отформированы образцы, в которых часть цементно-песчаного раствора в сердцевине заменена на гранулы керамзита. Данный прием не привёл к снижению прочности по сравнению с образцами, изготовленными без замены.

Следующей изученной характеристикой было водопоглощение бетона. Сравнивалось водопоглощение образцов наружного слоя образца (толщиной 20 мм), ядра и образцов из водозатворенной смеси. Полученные результаты свидетельствуют о более высоком водопоглощении ядра образца

Одной из важных характеристик изделия является качество поверхности. Стандартные цементно-песчаные растворы и бетоны из водозатворенной смеси характеризуются наличием большого количества раковин диаметром от 0,05 до 2 мм на гранях, контактирующих с поверхностью опалубки. Поверхность вибропрессованных изделий согласно требованиям СТБ 1071-2007 должна соответствовать категории А7 на нелицевой поверхности и категории А4 для лицевой по ГОСТ 13015.0-83. То есть, допускается наличие на лицевой поверхности раковин диаметром до 10 мм и наплывам до 1 мм.

Образцы, отформованные способом сухого формования, обладают ровной поверхностью, содержащую раковины диаметром не более 0,05 мм. Од-

нако, в связи с особенностями уплотнения сухих цементно-песчаных смесей, наблюдается расслоение смеси, выражающееся в высоком содержании песка на верхней грани образца, а также запесочиванием поверхности. Предполагается ликвидация данных дефектов при применении повторного вибрирования.

Сравнение изломов образцов сухого формования и из водозатворенных смесей показало, что сухое формование обеспечивает создание плотной структуры, характеризующееся малым содержанием пор. Такой же структурой обладают и вибропрессованные блоки. Образцы из водозатворенных смесей характеризуются высоким содержанием пор воздуха.

При помещении образцов в воду было зафиксировано образование потока пузырьков воздуха, что свидетельствует о наличии в теле бетона каналов достаточной величины, чтобы свести к нулю эффективность данного метода.

Согласно имеющимся в литературе данным, повторное вибрирование насыщенных блоков способствует существенному улучшению эксплуатационных характеристик бетона. Однако, в связи с необходимостью поддержания разрежения в сердцевине бетона, повторное вибрирование необходимо производить непосредственно после насыщения образца, пока в камере ещё поддерживается разрежение 0,08 МПа. В таком случае будут перекрыты фильтрационные каналы, а также перекрыты дефекты сухого уплотнения.

На данный момент ведётся работа над созданием устройства, облегчающего обращение с камерой и позволяющего осуществлять вибрирование всей конструкции. Данная установка позволит осуществлять более сложные эксперименты с варьированием времени вибрирования, порядка и интенсивности вибрационного воздействия и пр.

Выводы. 1. В ходе данной работы показана эффективность данного метода, выделены его сильные и слабые стороны, предложены пути повышения его эффективности. 2. Установлены факторы, влияющие на прочностные характеристики бетона сухого формования, в том числе, важность применения повторного вибрирования отформованных образцов. 3. Разработана и апробирована опытная установка для осуществления укладки, уплотнения, вакуумной активации и водонасыщения сухих бетонных смесей. 4. Намечены основные пути дальнейшего развития рассмотренной технологии, меры по повышению её эффективности, предложен проект новой, более совершенной установки.

Литература. 1. Батяновский Э. И. Особо плотный бетон сухого формования. - Мн.: НПО «Стринко», 2002. - 224 с. 2. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона - Минск : Наука и техника, 1977. - 230 с. 3. Львович, К.И. Песчаный бетон и его применение в строительстве. - СПб.: Строй-Бетон, 2007. 4. Овчинников И. П. Новый способ формования из сухих бетонных смесей // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1985. - № 6. - С. 77-79. 5. Хуторцов Г.М. Новый способ получения высокоплотных бетонов.- Бетон и железобетон, 1971, № 4, с.18-20.