

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О БЕТОНЕ

§ 1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

● *Бетонами называют искусственные каменные материалы, получаемые в результате затвердевания тщательно перемешанной и уплотненной смеси из минерального или органического вяжущего вещества с водой, мелкого или крупного заполнителей, взятых в определенных пропорциях. До затвердевания эту смесь называют бетонной смесью.*

В строительстве широко используют бетоны, приготовленные на цементах или других неорганических вяжущих веществах. Эти бетоны обычно затворяют водой. Цемент и вода являются *активными составляющими бетона*; в результате реакции между ними образуется цементный камень, скрепляющий зерна заполнителей в единый монолит.

Между цементом и заполнителем обычно не происходит химического взаимодействия (за исключением силикатных бетонов, получаемых автоклавной обработкой), поэтому заполнители часто называют *инертными материалами*. Однако они существенно влияют на структуру и свойства бетона, изменяя его пористость, сроки затвердевания, поведение при воздействии нагрузки и внешней среды. Заполнители значительно уменьшают деформации бетона при твердении и тем самым обеспечивают получение большеразмерных изделий и конструкций. В качестве заполнителей используют преимущественно местные горные породы и отходы производства (шлаки и др.). Применение этих дешевых заполнителей снижает стоимость бетона, так как заполнители и вода составляют 85...90%, а цемент — 10...15% от массы бетона.

В последние годы в строительстве широко используют легкие бетоны, получаемые на искусственных пористых заполнителях. Пористые заполнители снижают плотность бетона, улучшают его теплотехнические свойства.

Для регулирования свойств бетона и бетонной смеси в их состав вводят различные химические добавки, которые ускоряют или замедляют схватывание бетонной смеси, делают ее более пластичной и удобоукладываемой, ускоряют твердение бетона, повышают его прочность и морозостойкость, а также при необходимости изменяют и другие свойства бетона.

Бетоны на минеральных вяжущих веществах являются капиллярно-пористыми телами, на структуру и свойства которых за-

метное влияние оказывают как внутренние процессы взаимодействия составляющих бетона, так и воздействие окружающей среды.

В течение длительного времени в бетонах происходит изменение поровой структуры, наблюдается протекание структурообразующих, а иногда и деструктивных процессов и как результат — изменение свойств материала. С увеличением возраста бетона повышаются его прочность, плотность, стойкость к воздействию окружающей среды. Свойства бетона определяются не только его составом и качеством исходных материалов, но и технологией приготовления и укладки бетонной смеси в конструкцию, условиями твердения бетона. Все эти факторы учитывают при проектировании состава бетона и производстве конструкций на его основе.

На органических вяжущих веществах (битум, синтетические смолы и т. д.) бетонную смесь получают без введения воды, что обеспечивает высокую плотность и непроницаемость бетонов.

Многообразие вяжущих веществ, заполнителей, добавок и технологических приемов позволяет получать бетоны с самыми разнообразными свойствами.

Бетон является хрупким материалом: его прочность при сжатии в несколько раз выше прочности при растяжении. Для восприятия растягивающих напряжений бетон армируют стальными стержнями, получая железобетон. В железобетоне арматуру располагают так, чтобы она воспринимала растягивающие напряжения, а сжимающие напряжения передавались на бетон. Совместная работа арматуры и бетона обуславливается хорошим сцеплением между ними и приблизительно одинаковыми температурными коэффициентами линейного расширения.

Бетон предохраняет арматуру от коррозии.

Бетонные и железобетонные конструкции изготовляют либо непосредственно на месте строительства — монолитный бетон и железобетон, либо на заводах и полигонах с последующим монтажом на строительной площадке — сборный бетон и железобетон.

§ 1.2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА

Бетон — один из древнейших строительных материалов. Из него построены галереи египетского лабиринта (3600 лет до н. э.), часть Великой Китайской стены (III в. до н. э.), ряд сооружений на территории Индии, Древнего Рима и в других местах.

Однако использование бетона и железобетона для массового строительства началось только во второй половине XIX в., после получения и организаций промышленного выпуска портландцемента, ставшего основным вяжущим веществом для бетонных и железобетонных конструкций. Вначале бетон использовался для

возведения монолитных конструкций и сооружений. Применялись жесткие и малоподвижные бетонные смеси, уплотнявшиеся трамбованием. С появлением железобетона, армированного каркасами, связанными из стальных стержней, начинают применять более подвижные и даже литые бетонные смеси, чтобы обеспечить их надлежащее распределение и уплотнение в бетонируемой конструкции. Однако применение подобных смесей затрудняло получение бетона высокой прочности, требовало повышенного расхода цемента. Поэтому большим достижением явилось появление в 30-х годах способа уплотнения бетонной смеси вибрированием, что позволило обеспечить хорошее уплотнение малоподвижных и жестких бетонных смесей, снизить расход цемента в бетоне, повысить его прочность и долговечность.

В эти же годы был предложен способ предварительного напряжения арматуры в бетоне, способствовавший снижению расхода арматуры в железобетонных конструкциях, повышению их долговечности и трещиностойкости.

Проф. А. Р. Шуляченко в 80-х годах прошлого века разработал теорию получения и твердения гидравлических вяжущих веществ и цементов и доказал, что на их основе могут быть получены долговечные бетонные конструкции. Под его руководством было организовано производство высококачественных цементов. Проф. Н. А. Белелюбский в 1891 г. провел широкие испытания, результаты которых способствовали внедрению железобетонных конструкций в строительство. Проф. И. Г. Малюга в 1895 г. в своей работе «Составы и способы изготовления цементного раствора (бетона) для получения наибольшей крепости» обосновал основные законы прочности бетона. В 1912 г. был издан капитальный труд Н. А. Житкевича «Бетон и бетонные работы».

В начале века появляется много работ по технологии бетона и за рубежом. Из них наиболее важными были работы Р. Фере (Франция), О. Графа (Германия), И. Болеме (Швейцария), Д. Абрамса (США).

Широкое развитие получила технология бетона в Советском Союзе со времени первых крупных гидротехнических строителств — Волховстроя (1924 г.) и Днепростроя (1930 г.). Профессора Н. М. Беляев и И. П. Александрин возглавили ленинградскую научную школу по бетону и внедрили в практику строительства первые научные методы подбора состава бетона, значительно повысившие его качество.

В 30-е годы ученые московской школы бетона Б. Г. Скрамтаев, Н. А. Попов, С. А. Миронов, С. В. Шестоперов, П. М. Миклашевский и другие разработали методы зимнего бетонирования и тем самым обеспечили круглогодичное возведение бетонных и железобетонных конструкций, создали ряд новых видов бетона, в том числе легких, что позволило более широко использовать бетон при возведении жилых и производственных зданий,

разработали способы повышения долговечности бетона, основы технологии сборного железобетона.

В эти же годы большие работы проводились закавказской школой бетона под руководством академика АН Грузинской ССР К. С. Завриева, способствовавшие расширению применения железобетонных конструкций на стройках Кавказа, использованию в бетоне природных пористых заполнителей.

Применение бетонных и железобетонных конструкций сыграло решающую роль в строительстве первых пятилеток и в перебазировании промышленности в восточные районы страны в годы Великой Отечественной войны.

В послевоенный период наука о бетоне и железобетоне и практика применения этих материалов в строительстве получили особенно широкое развитие. Для обеспечения индустриализации строительства бурное развитие получает производство сборного железобетона.

В постановлении ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 19 августа 1954 г. «О развитии производства железобетонных конструкций и деталей для строительства» был намечен невиданный до того рост объема производства и применения сборного железобетона и установлены задачи по развитию его индустриальной базы. За последующие годы в стране была создана развитая промышленность сборного железобетона, насчитывающая около 6000 предприятий общей мощностью свыше 150 млн. м³ изделий, которая обеспечивает все виды строительства широкой номенклатурой изделий и конструкций. Объем производства вырос за эти годы более чем в 65 раз, и сегодня Советский Союз занимает первое место в мире по производству сборного железобетона, намного опередив наиболее развитые капиталистические страны.

Широкое применение сборного железобетона позволило значительно сократить в строительстве расход металла, древесины и других традиционных материалов, резко повысить производительность труда, сократить сроки возведения зданий и сооружений. Только в Москве применение сборных железобетонных конструкций и перенос в заводские условия части отделочных и монтажных операций в связи с применением железобетонных изделий повышенной готовности позволили за последние 20 лет сократить численность работающих в строительстве на 50 %.

В послевоенные годы создаются новые виды вяжущих веществ и бетонов, начинают широко применяться химические добавки, улучшающие свойства бетона, совершенствуются способы проектирования состава бетона и его технология.

Для обеспечения развития научных и технических основ производства железобетонных конструкций в стране развивается широкая сеть научных учреждений. Научные исследования по технологии бетона успешно ведут Научно-исследовательский ин-

ститут бетона и железобетона (НИИЖБ) Госстроя СССР, ведущий научные работы по различным проблемам проектирования и производства железобетонных конструкций, Всесоюзный научно-исследовательский институт по бетону и железобетону (ВНИИжелезобетон) Министерства промышленности строительных материалов, координирующий работы по заводскому производству сборного железобетона, многие кафедры и лаборатории вузов и ряд отраслевых научно-исследовательских институтов и лабораторий.

Проблемы технологии тяжелых бетонов получают развитие в работах Б. Г. Скрамтаева, И. Н. Ахвердова, Ю. М. Баженова, И. М. Грушко, О. П. Мчелова-Петросяна, А. В. Саталкина, А. Е. Шейкина и многих других ученых. Легким бетонам на пористых заполнителях посвящены работы Н. А. Попова, М. З. Симонова, И. А. Иванова и др.; силикатным и ячеистым бетонам — работы П. И. Боженова, А. В. Волженского, К. Э. Горяйнова и др.; вопросам реологии бетонной смеси и формированию изделий — работы А. Е. Десова, Г. Я. Кунноса, О. А. Савинова и др.; бетонированию зимой и в условиях сухого и жаркого климата — работы С. А. Миронова; И. Б. Заседателя, Б. Н. Крылова и др.; ускорению твердения — работы Л. А. Малининой и др.; повышению долговечности и коррозионной стойкости бетона — работы Г. И. Горчакова, О. В. Кунцевича, Ф. М. Иванова, В. М. Москвина, С. А. Шестоперова и др.; созданию специальных видов бетона — работы К. Д. Некрасова, Н. А. Мощанского, В. Д. Глуховского и др.; совершенствованию заводской технологии бетонных и железобетонных изделий — работы В. В. Михайлова, Э. Г. Ратца, В. И. Сорокера, И. Г. Совалова и др. В последние годы вопросы технологии бетона получают дальнейшее развитие в трудах В. Г. Батракова, В. А. Вознесенского, Б. В. Гусева, Н. Н. Долгополова, В. В. Потуроева, И. Е. Путляева, В. И. Соломатова, В. Б. Ратинова, И. А. Рыбьева, А. В. Ферронской и многих других ученых.

В ближайшие 10 ... 20 лет технология бетонов и производство сборного железобетона получат дальнейшее развитие. Основными направлениями при этом будут следующие: повышение эффективности и качества сборных железобетонных конструкций и изделий, снижение их металлоемкости и трудоемкости их производства; разработка и организация массового производства эффективных видов вяжущих веществ, арматурной стали, высококачественных заполнителей, комплексных химических добавок; коренное улучшение технологии производства железобетонных и бетонных конструкций путем массового внедрения новых более современных технологических процессов, высокопроизводительного автоматизированного оборудования, роботов и манипуляторов, совершенных систем контроля и управления качеством готовых изделий на основе развития методов прогнозирования свойств

бетона, широкого использования вычислительной техники; применение ресурсосберегающих и безотходных технологий; широкое использование вторичных продуктов и отходов промышленности, использование всех резервов производства с целью экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

§ 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ БЕТОНОВ

В настоящее время в строительстве используют различные виды бетона. Разобраться в их многообразии помогает классификация бетонов. Бетоны классифицируют по средней плотности, виду вяжущего вещества и назначению.

■ Многие свойства бетона зависят от его плотности, на величину которой влияют плотность цементного камня, вид заполнителя и структура бетонов. По плотности бетоны делят на *особо тяжелые* с плотностью более 2500 кг/м³; *тяжелые* — 1800 ... 2500; *легкие* — 500 ... 1800; *особо легкие* — менее 500 кг/м³.

Особо тяжелые бетоны готовят на тяжелых заполнителях — стальных опилках или стружках (сталебетон), железной руде (лимонитовый и магнетитовый бетоны) или барите (баритовый бетон).

В строительстве наиболее широко используют тяжелый бетон с плотностью 2100 ... 2500 кг/м³ на плотных заполнителях из горных пород (гранит, известняк, диабаз и др.). Облегченный бетон с плотностью 1800 ... 2000 кг/м³ получают на щебне из горных пород с плотностью 1600 ... 1900 кг/м³ или без песка (крупнопористый бетон).

Легкие бетоны изготовляют на пористых заполнителях (керамзит, аглопорит, вспученный шлак, пемза, туф и др.). Применение легких бетонов уменьшает массу строительных конструкций, удешевляет строительство, поэтому производство их развивается опережающими темпами.

К особо легким бетонам относятся ячеистые бетоны (газобетон, пенобетон), которые получают вспучиванием смеси вяжущего, тонкомолотой добавки и воды с помощью специальных способов, и крупнопористый бетон на легких заполнителях. В ячеистых бетонах заполнителем, по существу, является воздух, находящийся в искусственно созданных ячейках.

■ Главной составляющей бетона, во многом определяющей его свойства, является вяжущее вещество, по виду которого различают бетоны цементные, силикатные, гипсовые, шлакощелочные, полимербетоны, полимерцементные и специальные.

Цементные бетоны готовят на различных цементах и наиболее широко применяют в строительстве. Среди них основное место занимают бетоны на портландцементе и его разновидностях (около 65 % от общего объема производства), применяемые для различных видов конструкций и условий их эксплуата-

ции, успешно используются бетоны на шлакопортландцементе (около 20 ... 25 %) и пуццолановом цементе. К разновидностям цементных бетонов относятся: декоративные бетоны, изготавливаемые на белом и цветных цементах, бетоны для самонапряженных конструкций — на напрягающем цементе, бетоны для специальных целей, получаемые на особых видах цемента — глиноземистом, безусадочном и т. д.

Силикатные бетоны готовят на основе извести. Для производства изделий в этом случае применяют автоклавный способ твердения.

Гипсовые бетоны применяют для внутренних перегородок, подвесных потолков и элементов отделки зданий. Разновидностью этих бетонов являются гипсоцементно-пуццолановые бетоны, обладающие повышенной водостойкостью и более широкой областью применения (объемные блоки санузлов, конструкции малоэтажных домов и др.).

Шлакощелочные бетоны делают на молотых шлаках, затворенных щелочными растворами. Эти бетоны еще только начинают применяться в строительстве.

Полимербетоны изготавливают на различных видах полимерного связующего, основу которого составляют смолы (полиэфирные, эпоксидные, карбамидные и др.) или мономеры (фурфуролацетонный и др.), отверждаемые в бетоне с помощью специальных добавок. Эти бетоны более пригодны для службы в агрессивных средах и особых условиях воздействия (истирание, кавитация и т. д.).

Полимерцементные бетоны изготавливают и на смешанном связующем, состоящем из цемента и полимерного вещества. В качестве полимера используют, например, водорастворимые смолы и латексы.

Свойства бетонов на неорганических вяжущих можно улучшать путем пропитки мономерами с последующим их отверждением в порах и капиллярах бетона. Подобные материалы называют *бетонополимерами*.

Специальные бетоны готовят с применением особых вяжущих веществ. Для кислотоупорных и жаростойких бетонов применяют жидкое стекло с кремнефтористым натрием, фосфатное и другие связующие. В качестве специальных вяжущих используют шлаковые, нефелиновые, стеклощелочные и др., полученные из отходов промышленности, что имеет важное значение для экономии цемента и охраны окружающей среды.

■ Бетоны применяют для различных видов конструкций, как изготавливаемых на заводах сборного железобетона, так возводимых непосредственно на месте эксплуатации (в гидротехническом, дорожном строительстве и т. д.).

■ В зависимости от области применения различают: *обычный бетон* для железобетонных конструкций (фундаментов, колонн,

балок, перекрытий, мостовых и других типов конструкций); *гидротехнический бетон* для плотин, шлюзов, облицовки каналов, водопроводно-канализационных сооружений и т. д.; *бетон для ограждающих конструкций* (легкий); *бетон для полов, тротуаров, дорожных и аэродромных покрытий*; *бетоны специального назначения*, например жароупорный, кислотостойкий, для радиационной защиты и др.

В зависимости от назначения бетоны должны удовлетворять определенным требованиям. Бетоны для обычных железобетонных конструкций должны иметь заданную прочность, главным образом при сжатии. Для конструкций, находящихся на открытом воздухе, важна еще морозостойкость. Бетоны для гидротехнических сооружений должны обладать высокой плотностью, водонепроницаемостью, морозостойкостью, достаточной прочностью, малой усадкой, стойкостью против выщелачивающего действия фильтрующих вод, в ряде случаев стойкостью по отношению к действию минерализованных вод и незначительно выделять теплоту при твердении. Бетоны для стен отапливаемых зданий и легких перекрытий должны обладать необходимой прочностью, теплопроводностью, бетоны для полов — малой истираемостью и достаточной прочностью при изгибе, а бетоны для дорожных и аэродромных покрытий — еще и морозостойкостью.

К бетонам специального назначения предъявляются требования, обусловленные особенностью их службы.

■ Общие требования ко всем бетонам и бетонным смесям следующие: до затвердевания бетонные смеси должны легко перемешиваться, транспортироваться, укладываться (обладать подвижностью и удобоукладываемостью), не расслаиваться; бетоны должны иметь определенную скорость твердения в соответствии с заданными сроками распалубки и ввода конструкции или сооружения в эксплуатацию; расход цемента и стоимость бетона должны быть минимальными.

Получить бетон, удовлетворяющий всем поставленным требованиям, можно при правильном проектировании состава бетона, надлежащем приготовлении, укладке и уплотнении бетонной смеси, а также при правильном выдерживании бетона в начальный период его твердения.

Если вид и требования к свойствам бетона устанавливают в зависимости от вида и особенностей конструкции и условий ее эксплуатации, то требования к бетонной смеси определяются условиями изготовления конструкции, ее технологическими особенностями (густотой армирования, сложностью формы и др.), применяемым оборудованием.

Особенностью изготовления бетонных и железобетонных конструкций является то, что о качестве материала нельзя судить заранее. Необходимые свойства бетон приобретает в процессе изготовления конструкции. Отсюда важное значение имеют пра-

вильный выбор материалов, проектирование состава бетона с учетом принятой технологии изготовления конструкций, соблюдение технологических режимов, пооперационный контроль производства.

Бетоны относятся к искусственным каменным конгломератам, являющимся разновидностью композиционных материалов, поэтому для разных бетонов свойственны как свои собственные, частные, так и общие закономерности. Современные технологические и технико-экономические расчеты в области бетонов основываются на зависимостях, связывающих состав и структуру бетона с его свойствами. Эти зависимости учитывают физико-химическую природу бетона, но в большинстве своем получены экспериментальным путем. Они должны проверяться для конкретных условий производства и уточняться.

Бетон — сложный материал, свойства которого могут заметно изменяться в процессе выдерживания и эксплуатации. Только глубокое понимание природы этого материала, закономерностей, управляющих формированием его структуры и свойств, могут обеспечить рациональное и эффективное его применение в строительных конструкциях самого различного назначения.

ГЛАВА 2

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БЕТОНА

§ 2.1. ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Для приготовления бетона строительных конструкций наиболее широко используют неорганические вяжущие вещества. Эти вещества при смешивании с водой под влиянием внутренних физико-химических процессов способны схватываться (переходить из жидкого или тестообразного состояния в камневидное) и твердеть (постепенно увеличивать свою прочность). Различают неорганические вяжущие вещества водного (цементы) и воздушного (известь, гипс и др.) твердения.

Портландцемент. Наиболее широкое применение в производстве бетона получил портландцемент.

● **Портландцемент — гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде (лучше всего) или на воздухе.** Он представляет собой порошок серого цвета, получаемый тонким помолом клинкера с добавкой гипса. Клинкер получают путем равномерного обжига до спекания тщательно дозированной сырьевой смеси, содержащей около 75 ... 78 % CaCO_3 и 22 ... 25 % ($\text{CaO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Для получения цемента высокого качества необходимо, чтобы его химический состав, а следовательно, и состав сырьевой смеси были устойчивы. При помоле к цементному

клинкеру можно добавлять 10 ... 20 % гранулированных доменных шлаков или активных минеральных (кремнеземистых) добавок.

В результате обжига при температуре 1200 ... 1450 °C образуются клинкерные минералы: алюмоферриты кальция переменного состава $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, трехкальциевый алюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и трехкальциевый силикат $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Эти четыре соединения — основные составные части цементного клинкера, но два последних (силикаты кальция) составляют 70 ... 80 % от его массы. Ориентировочное содержание различных минералов в портландцементе составляет: 37 ... 60 % $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ или C_3S , 15 ... 37 % $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ или C_2S , 5 ... 15 % $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ или C_3A , 10 ... 18 % $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ или C_4AF .

Основное влияние на качество цемента оказывает высокое содержание трехкальциевого силиката (алита), который обладает свойствами быстротвердеющего гидравлического вещества высокой прочности. Двухкальциевый силикат (белит) — медленно твердеющее гидравлическое вяжущее средней прочности. Трехкальциевый алюминат твердеет быстро, но имеет низкую прочность. Свойства минералов цементного камня приведены в табл. 2.1. Изменяя минералогический состав цемента можно варьировать его качество. Цементы высоких марок и быстротвердеющие изготавливают с повышенным содержанием трехкальциевого силиката (алитовые цементы). Цементы с высоким содержанием белита (белитовые) медленно твердеют, однако прочность их нарастает в течение длительного времени и в возрасте нескольких лет может оказаться достаточно высокой.

Основным свойством, характеризующим качество любого цемента, является его *прочность (марка)*.

Таблица 2.1. Свойства клинкерных минералов

Минерал	Степень гидратации, % полной гидратации, в возрасте, сут				Глубина гидратации, мкм, в возрасте, сут				Относительная прочность* в возрасте, сут				Теплота гидратации, Дж/г, в возрасте, сут			
	3	7	28	180	3	7	28	180	1	7	28	180	3	7	28	180
C_3S	61	69	73	74	3,5	4,7	7,9	15	1	4,2	0,9	6,7	407	462	487	567
C_2S	18	30	48	66	0,6	0,9	1	2,7	0	0,1	0,63	5,2	63	105	168	235
C_3A	56	62	82	96	10,7	10,4	11,2	14,5	0,02	0,18	0,4	0,6	592	664	878	1029
C_4AF	31	44	66	91	7,7	8	8,4	13,2	0	0,2	0,25	0,4	176	252	378	—

* За единицу принята прочность C_3S в естественном возрасте.

Прочность цемента при сжатии колеблется от 30 до 60 МПа. Соответственно прочность балочек на изгиб составляет 4,5 ... 6,5 МПа. Цементы с прочностью от 30 до 40 МПа относят к марке 300, с прочностью 40 ... 50 МПа — к марке 400 и т. д. В строительстве применяют цементы марок 300, 400, 500, 550, 600.

Действительную прочность цемента называют его активностью. Например, если прочность контрольных образцов окажется 44 МПа, то активность этого цемента будет 44 МПа, а марка — 400. При проектировании состава бетона лучше использовать активность цемента, так как это обеспечивает более точные результаты и экономию цемента. Повышение прочности цемента на 1 МПа приводит к снижению расхода цемента на 2 ... 5 кг/м³, причем более заметное снижение наблюдается в высокопрочных бетонах. Если предположить, что учет активности цемента позволяет использовать в расчетах данные о прочности цемента на 2 ... 4 МПа более высокие, чем по его марке, то это будет обеспечивать экономию цемента 5 ... 20 кг/м³ бетона.

Цементная промышленность выпускает в основном цементы М400 ... 550, а по особому заказу — М600. Прочность цемента высоких марок нарастает быстрее, чем цемента низких марок. Например, цемент М500 уже через 3 сут имеет прочность 20 ... 25 МПа, поэтому цементы высоких марок являются не только высокопрочными, но и до известной степени быстротвердеющими. Применение таких цементов обеспечивает быструю распалубку конструкций и сокращает сроки изготовления сборных железобетонных изделий.

В лабораториях цементных заводов и на строительных объектах испытания цементов проводят также в более раннем возрасте — через 3 и 7 сут — и при пропаривании. Установив предварительными опытами переходный коэффициент прочности, можно по результатам краткосрочных испытаний ориентировочно определить марку цемента. При этом надо учитывать, что различные по минералогическому составу цементы будут твердеть с неодинаковой скоростью и для каждого цемента необходимо использовать свой коэффициент.

Помимо прочности к цементам предъявляются и другие требования, важными из которых являются нормальная плотность и сроки схватывания.

Нормальной густотой называют то содержание воды (%), которое необходимо добавить к цементу, чтобы получить определенную консистенцию цементного теста. Портландцементы имеют нормальную плотность 22 ... 27%, пуццолановые — 30% и более. Нормальная плотность увеличивается при введении в цемент при помеле тонкомолотых добавок, обладающих большой водопотребностью, например трепела, опоки. Наименьшую нормальную плотность имеют чисто клинкерные цементы. Нормальная плотность цемента в известной мере определяет реологические свойства це-

ментного теста и тем самым влияет на подвижность бетонной смеси. Чем меньше нормальная плотность цемента, тем меньше водопотребность бетонной смеси, необходимая для достижения определенной подвижности (жесткости) смеси. В среднем в зависимости от состава бетона уменьшение нормальной плотности цемента на 1% понижает водопотребность бетонной смеси на 2 ... 5 л/м³, причем большее снижение водопотребности наблюдается у высокопрочных бетонов. Сокращение расхода воды, в свою очередь, приводит к уменьшению расхода цемента. В бетонах желательнее применять цементы с пониженной нормальной плотностью.

Сроки схватывания цемента, определяемые на специальном приборе по глубине проникания иглы в цементное тесто, характеризуют начало и конец процесса превращения материала в твердое тело. По стандарту требуется, чтобы начало схватывания при температуре 20 °С наступало не ранее чем через 45 мин, а конец завершался не позднее чем через 10 ч с момента затворения цемента водой. В действительности начало схватывания цемента наступает через 1 ... 2 ч, а конец — через 5 ... 8 ч. Эти сроки обеспечивают производство бетонных работ, так как дают возможность транспортировать и укладывать бетонные смеси и растворы до их схватывания. Сроки схватывания цемента можно регулировать путем добавления в бетонную смесь при ее приготовлении различных химических добавок (рис. 2.1). Например, хлористый кальций ускоряет гидратацию и схватывание цемента, поверхностно-активные вещества (сульфитно-дрожжевая бражка и др.) — замедляют. Сроки схватывания уменьшаются также при повышении температуры бетона, уменьшении водоцементного отношения.

На некоторых цементных заводах производят помол горячего цементного клинкера, в результате чего температура цемента составляет 150 °С и выше. Это вызывает дегидратацию гипса с образованием как полугидрата гипса, так и полностью обезвоженного сульфата кальция (ангидрита в растворимой форме). Быстрая гидратация полуводного гипса и ангидрита при затворении цемента водой может вызвать преждевременное загустевание цементного теста или бетонной смеси, которые при дальнейшем перемешивании вновь разжижаются. Это явление получило название *ложного схватывания цемента*. Высококачественные цементы не должны иметь ложного схватывания. Если же оно наблюдается, то для нейтрализации этого явления в бетонную смесь вводят небольшое количество СДБ и увеличивают время перемешивания бетонной смеси.

Портландцемент имеет, как правило, тонкий помол: через сито № 008 (около 4900 отверстий на 1 см² с размером ячеек в свету 0,08×0,08 мм) должно проходить не менее 85% общей массы цемента. Средний размер частиц цемента составляет 15 ... 20 мкм.

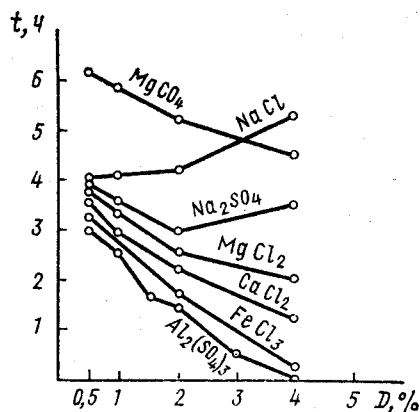


Рис. 2.1. Влияние химических добавок на срок схватывания цемента

Тонкость помола цемента характеризуют также удельной поверхностью зерен, содержащихся в 1 т цемента. Удельную поверхность цемента определяют специальным прибором. Цемент среднего качества имеет удельную поверхность 2000...2500 см²/г, высокого качества — 3500 см²/г и более.

Истинная плотность портландцемента без добавки составляет 3,05...3,15 г/см³. Плотность портландцемента при расчете состава бетона условно принимают в уплотненном состоянии 1,3 кг/м³.

Схватывание и твердение цемента

— экзотермические процессы. Практически 1 кг цемента М300 выделяет в бетоне за 7 сут с момента затворения цемента водой не менее 170 кДж, 1 кг цемента М400 — не менее 210 кДж. Тепловыделение цемента зависит от минералогического состава цементного клинкера, типа введенных добавок и тонкости помола. Из клинкерных минералов, входящих в состав цемента, наибольшее тепловыделение у трехкальцевого алюмината, затем у трехкальцевого силиката, у остальных оно значительно меньше. Основное тепло выделяется в течение первых 3...7 сут твердения цемента (см. табл. 2.1).

Перевозят и хранят цемент так, чтобы предохранить его от увлажнения, распыления и других потерь. На строительных объектах рациональна перевозка цемента на автомашине (цементовозах) со специальными кузовами и винтовыми или пневматическими транспортерами для выгрузки. При хранении даже в закрытых складах активность цемента, особенно тонкомолотого, постепенно падает, так как он поглощает влагу и углекислый газ из воздуха. Как показали опыты, обычный цемент при нормальных условиях хранения через 3 мес теряет до 20% прочности, через 6 мес — до 30%, через год — до 40%. При использовании в производстве лежалого цемента время перемешивания бетонной смеси увеличивают в 2...4 раза, вводят добавки — ускорители твердения или применяют активацию цемента.

Виды цемента. Основу большинства цементов составляет портландцементный клинкер. Нормируя его минералогический состав и вводя минеральные или органические добавки, получают различные цементы, несколько отличающиеся по свойствам и применяемые в разных областях строительства (табл. 2.2).

● **Портландцементом (ПЦ)** называют цемент, не содержащий в своем составе минеральных добавок, кроме гипса. Чисто клинкер-

Таблица 2.2. Требования к цементам

Виды цемента	Марка	Содержание добавок, %		
		гранулированного шлака	активных минеральных	
			трепела, опки, днато-мита	прочих
Цементы общестроительного назначения:				
портландцемент	400, 500	Не допускается		
портландцемент с минеральными добавками	400, 500	20	10	15
быстротвердеющий портландцемент	400, 500	20	10	15
шлакопортландцемент	300, 400	21...60	—	—
быстротвердеющий шлакопортландцемент	400	21...60	—	—
Цементы сульфатостойкие:				
сульфатостойкий портландцемент	400	Не допускается		
сульфатостойкий портландцемент с добавками	400, 500	10...20	5...10	Не допускается
сульфатостойкий шлакопортландцемент	300, 400	21...60	Не допускается	
пуццолановый цемент	300, 400	Не допускается	20...30	25...40

ный портландцемент без добавок применяют для высокопрочных бетонов, в производстве сборного железобетона, особенно предварительно напряженных конструкций, при строительстве в особых условиях — на Севере и в районах с сухим и жарким климатом.

● **Наиболее распространенными цементами, которые составляют более 60% от общего объема выпускаемых цементов, являются портландцементы с добавками.** Они могут применяться для большинства монолитных и сборных железобетонных конструкций, если к последним не предъявляются особые требования.

● **Быстротвердеющий цемент является разновидностью портландцемента с добавками.** Через 3 сут твердения прочность на сжатие этого цемента не менее 25 МПа, марки 400, 500. Для обеспечения быстрого твердения клинкер должен содержать $C_3S > 50\%$, $(C_3S + C_3A) > 60\%$, а цемент иметь тонкий помол (удельная поверхность не менее 3500 см²/г).

● **Шлакопортландцемент получают в результате совместного помола портландцементного клинкера и гранулированного доменного шлака.** Шлакопортландцемент отличается от портландцементов (при одинаковом составе клинкера) более медленным схватыванием (начало через 4...6 ч, конец через 10...12 ч) и твер-

дением в первые 7 ... 10 сут. Истинная плотность его немного ниже (2,9 ... 3,0), соответственно меньше и средняя плотность. Этот цемент при содержании в клинкере менее 8% C_3A дает бетон стойкий в отношении действия минерализованных вод (сульфатных, морской воды). При тепловлажностной обработке твердение шлакопортландцемента ускоряется в большей степени, чем обычного портландцемента, что обуславливает его высокую эффективность в производстве сборного железобетона.

Все цементы по согласованию с потребителем могут выпускаться с пластифицирующими или гидрофобизирующими добавками.

● *Сульфатостойкие цементы* выделены в отдельную группу (см. табл. 2.2). Сульфатостойкий портландцемент (СПЦ) выпускают М400. Сульфатостойкость цемента обеспечивается нормированием его минералогического состава, в котором ограничивается содержание менее стойких к сульфатной агрессии минералов. Этот цемент содержит 50% C_3S , 5% C_3A , 10 ... 22% (C_3A+C_4AF). Сульфатостойкий портландцемент с добавкой (СПЦД) получают совместным помолом портландцементного клинкера специального состава [$C_3A < 5\%$, (C_3A+C_4AF) $< 22\%$] и тонкомолотой активной минеральной добавки: трепела, опоки, диатомита (5 ... 10%) или доменного гранулированного шлака (10 ... 20%). Добавка связывает выделяющийся при гидратации C_3A гидрат оксида кальция, что способствует повышению сульфатостойкости цемента. Так как в этом случае возможно использование клинкера с высоким содержанием C_3A , то сульфатостойкий цемент с добавками имеет М400 и 500.

● *Сульфатостойкий шлакопортландцемент (СШПЦ)*, получают, ограничивая содержание в клинкере $C_3A < 8\%$; выпускают его М300, 400. Сульфатостойкие цементы предназначены для бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях переменного уровня воды, а также сооружений, которые подвергаются агрессивному воздействию сульфатных вод при одновременном многократном замерзании и оттаивании или многократном увлажнении и высыхании.

● *Пуццолановый портландцемент (ППЦ) также отнесен к группе сульфатостойких цементов. Этот цемент получают путем совместного помола портландцементного клинкера, содержащего $C_3A < 8\%$, с активной минеральной добавкой, которая вводится в большем количестве, чем в обычный портландцемент с добавкой. Содержание добавки зависит от ее вида и составляет для трепела, опоки, диатомита 20 ... 30%, для других активных минеральных, чаще всего кремнеземистых, добавок, например туфа, трасса, пемзы, — 25 ... 40%. Трепел, опоку, диатомит вводят в цементы в меньшем количестве, так как они обладают не только высокой гидравлической активностью и повышенной водопотребностью. Поэтому введение в цемент лишнего количества*

подобной добавки резко повышает его нормальную густоту, что нежелательно.

Пуццолановый портландцемент светлее обыкновенного и имеет меньшую плотность (2,8 ... 2,9), чем у обыкновенного цемента. При одинаковой дозировке по массе пуццолановый портландцемент дает более высокий выход смеси и плотность раствора и бетона, поэтому последние получаются более водонепроницаемыми. Чтобы получить тесто нормальной густоты, в пуццолановый портландцемент нужно добавить больше воды (до 30 ... 40%), причем образуется более вязкая смесь, чем при использовании обыкновенного цемента. Вследствие этого понижается подвижность бетонных смесей. Во избежание такого явления приходится несколько (на 5 ... 10%) увеличивать расход цемента в бетоне или вводить пластифицирующую добавку. В первые сутки и недели после смешивания с водой пуццолановый портландцемент твердеет медленнее, чем цемент без гидравлической добавки. После 6 мес твердения в воде этот цемент приобретает такую же прочность, как и цемент (из того же клинкера) без добавки.

Из-за связывания большей части свободного гидроксида кальция хорошо затвердевший пуццолановый портландцемент не выщелачивается пресной водой и не разрушается под действием морских и других минерализованных вод. Применять пуццолановый портландцемент целесообразно в тех случаях, когда необходима повышенная физико-химическая стойкость бетона и обеспечено его твердение во влажной среде.

Стандарт предусматривает дальнейшее повышение качества цемента. Снижение прочности до 5% против норм, установленных ГОСТом, допускается только в 5% отгруженных партий и не допускается при контрольных проверках качества цемента. Цементы с государственным Знаком качества должны обладать повышенной стабильностью прочностных свойств, значения коэффициента вариации активности не должны превышать 3 ... 5% в зависимости от марки цемента. В этих цементах не допускается «ложное схватывание», а температура при их отгрузке не должна превышать 95°C. В СПЦ и СПЦД ограничивается содержание щелочей (менее 1%).

Завод-изготовитель гарантирует соответствие цемента требованиям ГОСТа в момент получения цемента, но не более чем через месяц после отгрузки. В паспорте помимо вида и марки цемента и названия завода-изготовителя указывается нормальная густота цементного теста и средняя активность цемента при пропаривании по режиму 2+3+6+4 ч, при температуре изотермического прогрева (85 ± 5)°C и испытании через сутки с момента изготовления.

Специальные виды цемента и вяжущих. С каждым годом увеличивается номенклатура цементов, используемых для пригото-

ления бетона. Специальные цементы придают бетону особые свойства, расширяют возможности его применения в строительстве.

● *Белый портландцемент получают помолом маложелезистого отбеленного клинкера, приготовленного по специальной технологии, предотвращающей его загрязнение, с необходимым количеством гипса и небольшой добавкой диатомита.* Белый цемент выпускают М300, 400 и 500, он должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к обычным цементам. По степени белизны белый цемент подразделяют на три сорта: высший, Бц-I и Бц-II. Белизна цемента характеризуется коэффициентом яркости, представляющим отношение белизны цемента к белизне сернокислого бария, принятой за 100%. В зависимости от сорта коэффициент яркости должен быть не менее 80, 76 и 72%.

● *Цветные портландцементы получают совместным помолом белого цемента, гипса и пигмента. Содержание минерального синтетического или природного пигмента не должно превышать 15%, а органического пигмента — 0,3% от массы цемента.* Возможно получение цветного портландцемента путем помола специально приготовленного цветного клинкера.

Белый и цветные цементы предназначены для получения цветных бетонов, архитектурных деталей, облицовочных плит, проведения отделочных работ.

● *Напрягающий цемент получают совместным помолом портландцементного клинкера и напрягающего компонента, который включает глиноземистый шлак или другие алюмосодержащие вещества, гипс и известь.* Среднее соотношение между компонентами 65:20:10:5. Вследствие перекристаллизации низкосульфатной формы гидросульфата алюмината кальция в высокосульфатную форму напрягающий цемент обладает способностью значительно расширяться в объеме (до 4%) после достижения цементным камнем сравнительно большой прочности 15...20 МПа, что позволяет применять этот цемент для изготовления самонапряженного железобетона, в котором арматура получает предварительное напряжение вследствие расширения бетона. Этот напрягающий цемент отличается от других расширяющихся цементов, которые увеличиваются в объеме лишь в ранние сроки твердения. Напрягающий цемент и бетоны на его основе обладают высокими прочностью, водо- и газонепроницаемостью. Напрягающий цемент целесообразно применять для изготовления самонапряженных железобетонных труб, покрытий дорог и аэродромов, тоннелей и водопроводов большого диаметра и других подобных конструкций. При этом следует учитывать быстрое схватывание напрягающего цемента (начало схватывания 2 мин, конец схватывания 6 мин), а также необходимость применения специальных режимов твердения, обеспечивающих расширение цемента лишь после достижения бетоном прочности, необходимой для заанкеривания арматуры.

● *Расширяющиеся, или безусадочные, цементы применяют для приготовления водонепроницаемых бетонов. Особенностью этих цементов является наличие составляющих, увеличивающихся в объеме в результате физико-химических процессов, происходящих при твердении цемента.* Известно большое количество рецептов таких цементов, которые выпускались отдельными партиями для специальных целей. В последние годы для регулирования изменения объема бетона в процессе его твердения вместо расширяющихся цементов применяют комплексные добавки, вводимые в растворы и бетоны на обычном портландцементе.

● *Фосфатные цементы применяют для изготовления жаростойких и других специальных бетонов. Твердение этих цементов происходит за счет взаимодействия некоторых тонкоизмельченных оксидов (диоксида титана, оксида меди, оксида магния, оксида цинка и др.) и специальных составов с фосфорной кислотой.* Цементы обладают высокой прочностью и стойкостью при воздействии высоких температур, но в зависимости от состава требуют особых режимов твердения, так как при неправильной технологии в бетонах могут значительно развиваться деструктивные явления, например вспучивание массы, понижающие конечную прочность материала.

● *Кислотоупорный цемент применяют для изготовления кислотостойких или жаростойких бетонов. Этот цемент состоит из тщательно перемешанного молотого кварцевого песка и кремнефтористого натрия, его затворяют на жидком стекле — коллоидном растворе натриевого или калиевого силиката $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ с плотностью 1,32...1,50, обладающем вязкими свойствами.* Для получения необходимой консистенции жидкое стекло разбавляют водой. Жидкое стекло твердеет на воздухе вследствие высыхания и выделения аморфного кремнезема под действием углекислого газа. Для ускорения твердения жидкого стекла и повышения плотности цементного камня используют кислотоупорный цемент. Входящий в его состав кремнефтористый натрий является катализатором твердения, повышающим водостойкость и кислотоупорность затвердевшего материала. Обычно добавка кремнефтористого натрия должна составлять 12...15% от массы растворимого стекла.

В последние годы проводятся работы по дальнейшему улучшению свойств цемента. Разработаны и внедряются в производство цементы с добавкой крентов (кристаллизационных компонентов, которые способствуют кристаллизации гидросиликатов и трехсульфатной формы гидросульфата алюминатов. В результате повышается на 5...15% прочность цемента (в среднем на 10 МПа), улучшаются его морозо- и сульфатостойкость.

Разрабатываются также цементы на основе сульфата алюмината клинкеров, которые обладают быстрым твердением и высо-

кой прочностью (через 24 ч — 20 ... 30 МПа, через 1 сут — 40 ... 50 МПа).

Известь. Для производства силикатных бетонов, получивших в последние годы широкое применение в строительстве, в качестве вяжущего используют воздушную известь.

● *Воздушная известь* — простейшее вяжущее, получаемое умеренным обжигом карбонатных пород (известняка, мела, ракушечника, отходов химических производств и др.), содержащих не более 8% глинистых примесей. В строительстве применяют негашеную известь, основной частью которой является безводный оксид кальция CaO , и гашеную, получаемую в результате соединения негашеной извести с водой и состоящую в основном из $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В воздушную известь можно вводить минеральные добавки — молотые горные породы или отходы промышленного производства (доменные и топливные шлаки и золы, вулканические туфы, опоки и пемзы, кварцевые пески, гипсовый камень).

По качеству в зависимости от содержания активных CaO и MgO известь делят на три сорта (соответственно в извести без добавок их содержание должно быть 90, 80, 70%, а в извести с добавками — 64 и 52%).

В зависимости от скорости гашения различают *известь быстрогасящуюся* — скорость гашения до 20 мин и *медленногасящуюся* — скорость гашения более 20 мин.

При твердении на воздухе прочность известковых растворов и бетонов в возрасте 20 сут составляет всего 0,5 ... 3 МПа. Прочность может быть заметно повышена путем автоклавной обработки изделий — при давлении 0,8 МПа и температуре 175 °С, в результате чего при взаимодействии извести с кремнеземом заполнителя образуются сравнительно прочные гидросиликаты. Этот прием используют для получения автоклавного силикатного бетона прочностью 20 ... 50 МПа и более, а также для производства ячеистых бетонов. Для получения автоклавных силикатных материалов используют быстрогасящуюся известь с содержанием оксида магния не более 5%.

§ 2.2. ЗАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ БЕТОНА

● *Заполнители занимают в бетоне до 80% объема и оказывают влияние на свойства бетона, его долговечность и стоимость.* Введение в бетон заполнителей позволяет резко сократить расход цемента, являющегося наиболее дорогим и дефицитным компонентом. Кроме того, заполнители улучшают технические свойства бетона. *Жесткий скелет из высокопрочного заполнителя несколько увеличивает прочность и модуль деформации бетона, уменьшает деформации конструкций под нагрузкой, а также ползучесть бетона — необратимые деформации, возникающие при длительном действии нагрузки.* Заполнитель уменьшает усадку бетона, спо-

собствуя получению более долговечного материала. Усадка цементного камня при его твердении достигает 1 ... 2 мм/м. Из-за неравномерности усадочных деформаций возникают внутренние напряжения и даже микротрещины. Заполнитель воспринимает усадочные напряжения и в несколько раз уменьшает усадку бетона по сравнению с усадкой цементного камня.

Пористые естественные и искусственные заполнители, обладая малой плотностью, уменьшают плотность легкого бетона, улучшают его теплотехнические свойства. В специальных бетонах (жаростойких, для защиты от радиации и др.) роль заполнителя очень высока, так как его свойства во многом определяют специальные свойства этих бетонов.

В силикатных бетонах заполнитель помимо своего обычного назначения играет особо важную роль, так как его зерна с поверхности вступают во взаимодействие с вяжущим веществом и от их минералогического состава и удельной поверхности во многом зависят свойства получаемого бетона.

Стоимость заполнителя составляет 30 ... 50% (а иногда и более) от стоимости бетонных и железобетонных конструкций, поэтому применение более доступных и дешевых местных заполнителей в ряде случаев позволяет снизить стоимость строительства, уменьшает объем транспортных перевозок, обеспечивает сокращение сроков строительства.

Правильный выбор заполнителей для бетона, их разумное использование — одна из важных задач технологии бетона.

В бетоне применяют крупный и мелкий заполнитель. Крупный заполнитель (более 5 мм) подразделяют на гравий и щебень. Мелким заполнителем в бетоне является естественный или искусственный песок.

К заполнителям для бетона предъявляются требования, учитывающие особенности влияния заполнителя на свойства бетона. Заполнитель представляет собой совокупность отдельных зерен, т. е. является зернистым материалом, для которого имеется ряд общих закономерностей. Наиболее существенное влияние на свойства бетона оказывают зерновой состав, прочность и чистота заполнителя.

■ *Зерновой состав* показывает содержание в заполнителе зерен разной крупности. Он определяется просеиванием пробы заполнителей через стандартные сита с величиной отверстий от 0,14 до 70 мм и более. Различают рядовой заполнитель, содержащий зерна различных размеров, и фракционированный, когда зерна заполнителя разделены на отдельные фракции, включающие зерна близких между собой размеров, например 5 ... 10 или 20 ... 40 мм. Заполнитель характеризуется наименьшей и наибольшей крупностью, под которыми понимают размеры наименьших или наиболее крупных зерен заполнителя. В заполнителе могут встречаться отдельные зерна меньше или крупнее предельных

размеров, однако их должно быть не более 5%. Зерновой состав называют непрерывным, если в нем встречаются зерна всех размеров — от наименьшего до наибольшего. Если же в заполнителе отсутствуют зерна какого-либо промежуточного размера, то такой зерновой состав называют прерывистым.

Существует много предложений по назначению оптимального зернового состава заполнителя. Большинство исследователей считают более эффективным непрерывный зерновой состав заполнителей, так как хотя смеси с прерывистым составом при исключении фракций средних размеров и обеспечивают меньшую пустотность смеси, однако в них подвижность мелких зерен, защемленных между крупными, ограничена и для получения определенной подвижности бетонной смеси толщина обмазки зерен цементным тестом должна быть более толстой, чем в смесях с непрерывным зерновым составом, причем это происходит в условиях, когда возрастает объем мелкой фракции, а следовательно, и удельная поверхность заполнителя. В результате увеличивается расход цемента на обмазку зерен и уменьшается возможность экономии цемента за счет уменьшения пустотности заполнителя. Кроме того, смеси с прерывистым зерновым составом склонны к расслоению, что отрицательно сказывается на однородности бетона.

Для выбора непрерывного зернового состава заполнителя предлагались различные «идеальные» кривые просеивания. Поскольку нельзя получить смесь одновременно с минимальным объемом пустот и наименьшей удельной поверхностью зерен (ибо минимизацию можно проводить только по одному фактору), идеальная кривая подбирается из условия, чтобы количество пустот в смеси и суммарная поверхность зерен требовали минимального расхода цемента для получения определенной подвижности бетонной смеси и прочности плотного бетона. При подборе соотношения зерен различных размеров по идеальной кривой получают наиболее подвижные смеси при одном и том же расходе цемента, менее склонные к расслаиванию.

Примером подобных идеальных кривых могут служить кривые просеивания, предложенные Фуллером и Боломеем, уравнение которых имеет вид

$$y = k_{\phi} + (100 - k_{\phi}) \sqrt{\frac{x}{D_{\text{пр}}}} \quad (2.1)$$

где k_{ϕ} — коэффициент формы, $k_{\phi} = 8 \dots 14$; x — размер зерен данной фракции; $D_{\text{пр}}$ — предельная крупность заполнителя.

На практике подбор состава заполнителей точно по идеальной кривой требует дополнительных операций по рассеву песка и щебня. Часть материала отдельных фракций может оказаться лишней, а для пополнения других фракций иногда требуется до-

полнительное дробление. Поэтому на практике подобная методика не получила распространения.

На строительных объектах или заводах сборного железобетона зерновой состав заполнителя подбирают, используя реальные песок и щебень и устанавливая такое соотношение между ними, чтобы кривая зернового состава по возможности приближалась к идеальной кривой, однако допустимы некоторые отклонения. Некоторое ухудшение зернового состава в этом случае легко компенсируется или очень незначительным повышением расхода цемента, или более эффективным способом уплотнения бетонной смеси, при этом достигается заметное упрощение технологии и снижение стоимости бетона. Поэтому в ГОСТах и ТУ всегда указывается не один рекомендуемый зерновой состав, а допускаются колебания в соотношениях отдельных фракций, при которых еще не наблюдается значительного ухудшения свойств смеси заполнителей.

Правильный выбор зернового состава заполнителя или соотношения между песком и щебнем может быть сделан только с учетом состава бетона, в частности с учетом содержания цемента и воды (см. гл. 10). В бетонах низких и средних марок с расходом цемента $200 \dots 300 \text{ кг/м}^3$ при подвижной бетонной смеси наилучшие результаты обеспечивает зерновой состав, близкий к идеальным кривым просеивания. В бетонах высокой прочности с повышенными расходами цемента и в жестких бетонных смесях долю песка или мелких фракций заполнителя в его общем объеме целесообразно несколько уменьшать, исходя из конкретных свойств заполнителя и состава бетона.

С зерновым составом непосредственно связана пустотность заполнителя, определяемая возможностью его плотной укладки. На пустотность влияет также форма его зерен. Пустотность заполнителя является важной характеристикой, так как в известной мере определяет расход цемента (чем больше пустот, тем больше требуется цемента для их заполнения) и другие свойства бетона.

Теоретически объем пустот в заполнителе не зависит от крупности его зерен. Представим себе, что все зерна заполнителя имеют один размер и располагаются в кубе единичного объема либо рядами, либо в шахматном порядке (рис. 2.2). В первом случае число шаров, помещающихся по одной стороне куба, составляет

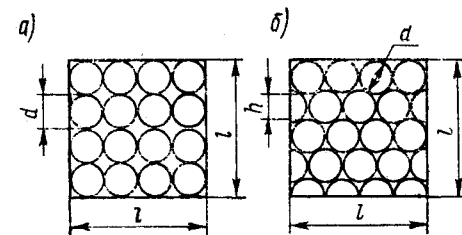


Рис. 2.2. Расположение зерен заполнителя: а — при рядовой укладке; б — при шахматной укладке

$n=1/d$, количество шаров во всем объеме $N=n^3=1/d^3$, а объем всех шаров $V_{ш}=N\pi d^3/6=\pi/6$.

Следовательно, объем пустот не зависит от диаметра шаров и равен

$$V_n=1-\pi/6=1-3,14/6=0,476.$$

При шахматном (более плотном) расположении шаров

$$n_1=1/h=2/(d\sqrt{3});$$

$$N_1=nn_1^2=\frac{1}{d}\left(\frac{2}{d\sqrt{3}}\right)^2=\frac{4}{3d^3};$$

$$V_{ш}=N_1\pi d^3/6=2\pi/9=0,7; V_{п}=0,3.$$

На объем пустот оказывает влияние форма зерен (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Пустотность (%) зернового материала в зависимости от формы зерен

Форма зерен	Укладка		
	наиболее плотная	наименее плотная	средняя
Кубы	0	87,1	43,55
Октаэдры	12,2	83,9	48,05
Додекаэдры	14,1	60,7	37,40
Икосаэдры	10,8	59,9	35,10
Шары	26,2	47,6	36,90

В действительности наиболее и наименее плотные укладки мало вероятны и практически будут иметь место какая-то промежуточная система укладки и, следовательно, средняя пустотность, определяемая степенью уплотнения. С увеличением угловатости зерен вероятные значения пустотности возрастают. Особенно же увеличивается пустотность при применении зерен удлиненной формы (игольчатых, лещадных).

Если наполнитель представляет собой смесь зерен разной формы, то с увеличением в ней зерен окатанной формы пустотность уменьшается, что подтверждают данные, приведенные на рис. 2.3. При совмещении зерен разной крупности более мелкие зерна будут располагаться в пустоте между более крупными и пустотность наполнителя уменьшается.

Если имеются зерна двух фракций, значительно различающихся по размерам, то изменение пустотности смеси при их смешивании соответствует рис. 2.4.

Примем обозначения: $V_{п}$ — объем пустот; $V_{з}$ — абсолютный объем зерен наполнителя; $V=V_{п}+V_{з}$ — полный объем смеси; $P_{от}=\frac{V_{п}}{V}$ — пустотность в относительных величинах; $P_{а}=\frac{V_{п}}{V_{з}}$ — пустотность по отношению к абсолютному объему зерен наполнителя.

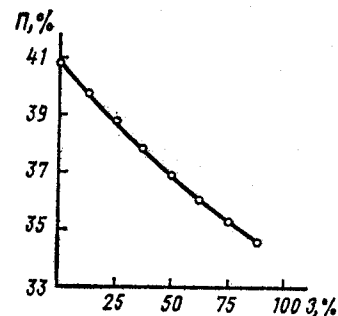


Рис. 2.3. Влияние формы зерен наполнителя на его пустотность:

3 — содержание наполнителя окатанной формы

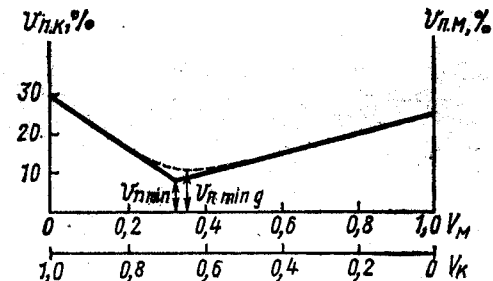


Рис. 2.4. Зависимость объема пустот смеси от содержания мелкого и крупного наполнителя

При заполнении пустот крупного наполнителя зернами мелкой фракции пустотность будет уменьшаться:

$$V_{п1}=P_{а.к}V_{з.к}-V_{з.м}=P_{от.к}V-V_{з.м}. \quad (2.2)$$

При добавлении крупных зерен к мелкой фракции вследствие замещения части объема крупными зернами, не имеющими пустот, пустотность наполнителя будет тоже уменьшаться:

$$V_{п2}=P_{а.м}V_{з.м}=P_{от.м}(V-V_{з.к}). \quad (2.3)$$

Формула (2.2) применяется при условии $V_{м}<P_{а.к}V_{з.к}$, т. е. когда объем мелкой фракции не превосходит объема пустот крупной фракции. Формула (2.3) действительна при условии $V_{м}>P_{а.к}V_{з.к}$, как при избытке песка по сравнению с объемом пустот крупной фракции. Теоретически наименьший объем пустот можно определить по формуле

$$V_{п\min}=P_{от.м}P_{от.к}V. \quad (2.4)$$

В действительности минимальный объем пустот $V_{п\min}$ всегда несколько больше, так как на практике не удастся достигнуть идеального распределения зерен.

Если зерна смешиваемых фракций не очень отличаются размером, то размер мелких зерен окажется больше, чем размер пустот между крупными зернами, и мелкие зерна, не уместаясь в пустотах, несколько раздвинут крупный наполнитель. В результате пустотность всей системы может не только уменьшиться, но даже увеличиться. Для получения наиболее плотной смеси двух фракций необходимо, чтобы размер зерен одной фракции был приблизительно в 6,5 раза меньше размера зерен другой фракции (смешивание крупного наполнителя с песком). Однако большее распространение получили наполнители с непрерывным зерновым составом, хотя и

имеющие несколько повышенную пустотность, но менее склонные к расслоению и чаще встречающиеся на практике.

Пустотность заполнителей колеблется от 20 до 50 %. В бетоне желательно использовать заполнители, состоящие из нескольких фракций и имеющие наименьшую пустотность.

Соотношение между песком и щебнем (гравием), при котором получается минимальная пустотность, можно ориентировочно определить, полагая, что песок полностью заполнит пустоты между зернами крупного заполнителя с учетом некоторой их раздвижки зернами песка. Тогда

$$П/\rho_{п} = П_{от.щ} (Щ/\rho_{щ}) \alpha,$$

где П, Щ — расходы песка и щебня; $\rho_{п}$, $\rho_{щ}$ — соответственно плотность песка и щебня; $П_{от.щ}$ — относительная пустотность щебня; α — коэффициент раздвижки.

Пустотность песка или щебня легко определить, зная истинную плотность материала ρ для пористого щебня или гравия, истинную плотность в куске $\rho_{щ}^к$ и насыпную плотность ρ' :

$$П_{от} = \frac{\rho - \rho'}{\rho} = 1 - \frac{\rho'}{\rho};$$

$$П_{от} = \frac{\rho_{щ}^к - \rho'}{\rho_{щ}^к} = 1 - \frac{\rho'}{\rho_{щ}^к}. \quad (2.5)$$

На основании многих опытов, принимая $\alpha = 1,1$, получим

$$П/Щ = П_{от} \frac{\rho_{п}}{\rho_{щ}} 1,1.$$

Однако смесь с минимальной пустотностью не всегда будет оптимальной в бетоне, так как при выборе правильного соотношения между песком и щебнем необходимо учитывать расходы цемента и воды. При большом расходе цемент не только заполняет пустоты в песке, но для него необходим еще дополнительный объем, который рационально выделить за счет сокращения доли песка, так как в этом случае улучшается подвижность бетонной смеси (см. гл. 10).

При технологических расчетах иногда приходится определять не только пустотность щебня, но и общую пористость $П_{общ}$ материала, когда объем межзерновых пустот суммируется с объемом пор в щебне или гравии. Пористость зерен заполнителя находят из выражения

$$П_{з.щ} = 1 - \rho_{щ}^к/\rho_{щ},$$

или

$$П_{з.щ} = \left(1 - \frac{\rho_{щ}^к}{\rho_{щ}}\right) 100\%. \quad (2.6)$$

Таблица 2.4. Расчетная удельная поверхность отдельных фракций заполнителя

Фракции, мм	Предельный размер частиц, мм	Расчетная удельная поверхность, м ² /л абсолютного объема
20...10	10...20	0,4
10...5	5...10	0,8
2,5...5	2,5...5	1,6
2,5...1,2	1,2...2,5	3,25
1,2...0,6	0,6...1,2	6,67
0,6...0,3	0,3...0,6	13,33
0,2...0,15	0,15...0,3	26,67
Менее 0,15	0...0,15	80
Пылевидные частицы	0,05...0,15	160
Илистые частицы	0,005...0,05	218
Глинистые частицы	Менее 0,005	2400

■ Важной характеристикой заполнителя, связанной с его зерновым составом и определяющей его влияние на свойства бетона и бетонной смеси, является *удельная поверхность* зерен заполнителя.

Применительно к рядовому расположению шаров (см. рис. 2.2) суммарная поверхность зерен, заключенных в единице объема, составит

$$s = N\pi d^2 = (1/d^3)\pi d^2 = \pi/d.$$

Отсюда следует, что поверхность зерен обратно пропорциональна диаметру зерен. С уменьшением размера зерен их поверхность возрастает. Удельная поверхность несколько увеличивается при наличии угловатых зерен. В табл. 2.4 приведены данные по изменению расчетной удельной поверхности зерен (шаровидной формы) при уменьшении их размеров. Очень значительно возрастает удельная поверхность при диаметре зерен менее 1 мм.

Удельная поверхность заполнителя может быть ориентировочно определена по формуле А. С. Ладинского:

$$s_s = \frac{16,5R_{\phi}}{1000} (a + 2b + 4c + 8d + 16e + 32f), \quad (2.7)$$

где R_{ϕ} — коэффициент, учитывающий форму зерен и другие особенности заполнителя; по данным В. М. Москвина, $R_{\phi} = 1,5 \dots 2,5$; a, b, c, d, e, f — соответственно частные остатки на ситах с размером отверстий 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,14 мм и количество заполнителя, прошедшее через сито с отверстием 0,14 мм.

При определении удельной поверхности щебня частные остатки делят на коэффициенты по мере возрастания размера зерен: частный остаток на сите 5 мм — на коэффициент 2, на ситах 10, 20, 40 мм — соответственно на 4, 8, 16.

Существуют приборы, позволяющие определять удельную поверхность непосредственно опытным путем, однако для одного материала по разным методикам получают неодинаковые величины удельной поверхности заполнителя. Поэтому при сравнении удельной поверхности заполнителей с различающимся зерновым составом необходимо пользоваться какой-то одной методикой определения.

Удельные поверхности природных среднезернистых песков колеблются от 50 до 100 см²/г.

Для получения монолитного бетона необходимо, чтобы цементное тесто не только заполнило пустоты между зернами песка, но и раздвинуло зерна с целью создания между ними цементной прослойки. Расход цемента на получение подобной оболочки зависит от удельной поверхности заполнителя, возрастая с уменьшением размера зерен. В результате с увеличением удельной поверхности заполнителя либо повышается техническая вязкость бетонной смеси, либо для получения определенной жесткости или подвижности смеси приходится увеличивать расход воды и соответственно расход цемента, чтобы обеспечить получение бетона заданной прочности.

Добавление к крупному заполнителю мелкого уменьшает его пористость, но одновременно увеличивает удельную поверхность, поэтому окончательное влияние заполнителя на бетон лучше всего определять непосредственным испытанием заполнителя в бетоне.

■ Прочность заполнителя определяется не только прочностью горной породы, из которой он получен, но и крупностью зерен. При выветривании или дроблении породы разрушение происходит по более слабым местам структуры и с уменьшением размера зерен прочность их как бы повышается. Естественные пески обладают прочностью при сжатии и растяжении, как правило, более высокой, чем прочность раствора или цементного камня. Прочность крупных заполнителей из прочных горных пород (гранита, диабаз и др.) превосходит по прочности раствор. Прочность пористых заполнителей может быть равна или меньше прочности раствора. Зависимость прочности бетона R_6 от прочности раствора R_p показана на рис. 2.5.

Прочность бетона на гранитном щебне ($R_3 > R_6$) несколько выше прочности раствора. При применении менее прочного крупного заполнителя прочность бетона при увеличении прочности раствора возрастает лишь до определенных значений и дальнейшее повышение прочности раствора не приводит к повышению прочности бетона. Предельно достижимая прочность бетона тем ниже, чем меньше прочность крупного заполнителя, причем ее значение зависит также и от содержания заполнителя, постепенно увеличиваясь с уменьшением его количества. Влияние крупного заполнителя на прочность бетона приходится учитывать при проектировании составов легкого бетона на пористых заполнителях. В этом случае

для получения соответствующей плотности в бетон вводят легкий пористый заполнитель. Следует заметить, что выше линии ON (рис. 2.5) располагается область наиболее экономичных по расходу цемента составов, которые желательно применять на производстве.

■ Большое влияние на прочность бетона оказывает чистота заполнителя. Пылевидные и особенно глинистые примеси создают на поверхности зерен заполнителя пленку, препятствующую сцеплению их с цементным камнем. В результате прочность бетона значительно понижается (иногда на 30... 40%). Корректировать отрицательное влияние грязного или некачественного заполнителя на свойства бетона путем повышения расхода цемента недопустимо.

● Природный песок, применяемый для производства обычного бетона, представляет собой образовавшуюся в результате выветривания горных пород рыхлую смесь зерен (крупностью 0,14 ... 5 мм) различных минералов, входящих в состав изверженных (реже осадочных) горных пород. При отсутствии природного песка применяют песок, получаемый путем дробления твердых горных пород.

Песок для производства обычного бетона, должен соответствовать требованиям ГОСТ 10268—80. Содержание в песке зерен, проходящих через сито 0,14 мм, не должно превышать 10%, а содержание глинистых, илистых и пылевидных примесей, определяемых отмучиванием, — 3% по массе. Наиболее вредна примесь глины, так как она, обволакивая зерна песка, препятствует сцеплению с цементным камнем. От глинистых примесей песок очищают тщательной промывкой. Органические примеси (например, гумусовые) допускаются только в очень незначительном количестве, так как они (особенно органические кислоты) понижают прочность и даже разрушают цемент.

Крупность зерен определяют просеиванием песка через стандартный прибор сит с отверстиями в свету 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 мм. Наличие в песке зерен крупнее 10 мм не допускается, зерен размером 5 ... 10 мм должно быть не более 5% (по массе). Среднюю пробу сухого песка массой 1 кг просеивают, начиная с самого крупного сита. Остатки на каждом сите (%), называемые частными, характеризуют распределение зерен песка по степеням крупности, т. е. зерновой (гранулометрический) состав песка. Складывая частный остаток на данном сите с суммой остатков на пре-

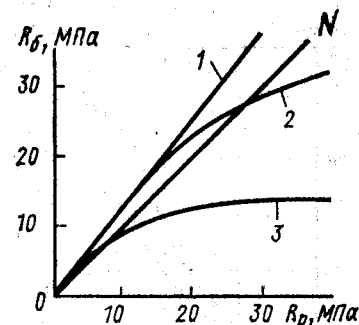


Рис. 2.5. Зависимость прочности бетона от прочности его растворной составляющей при применении заполнителей:

1 — высокопрочных гранитных; 2 — средней прочности; 3 — слабых (кварцитовый гравий)

Таблица 2.5. Характеристика песка по крупности

Группа песка	Модуль крупности	Полный остаток на сите 0.63%	Водопотребность, %
Крупный	3,5...2,5	50...70	4...6
Средний	2,5...2,0	35...50	6...8
Мелкий	2,0...1,5	20...35	8...10
Очень мелкий	1...1,5	Менее 20	Более 10

дыдущих ситах, определяют полные остатки (%) на ситах.

Для условного выражения крупности песка пользуются модулем крупности, обозначающим сумму полных остатков (%) на ситах стандартного набора, деленную на 100:

$$M_{кр} = \frac{\sum \Delta G_{полн}}{100}. \quad (2.8)$$

Результаты просеивания песка можно представить графически. На рис. 2.6 в виде заштрихованной полосы указаны допустимые пределы колебаний зернового состава песка для бетона. При оценке зернового состава песка учитывают только зерна, проходящие через сито 5 мм. Кривая просеивания песка, получаемая по результатам ситового анализа, должна находиться между верхней и нижней ломаными линиями.

Модуль крупности позволяет оценивать влияние заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона лишь приблизительно. Смеси с различным зерновым составом могут иметь одинаковый модуль крупности, но различные пустотность и удельную поверхность и соответственно по-разному влиять на подвижность и другие свойства бетонной смеси и бетона.

По крупности пески разделяют на крупные, средние, мелкие и очень мелкие, или тонкие (табл. 2.5).

Если песок крупный, то это еще не значит, что он вполне пригоден для бетона. Крупный песок может иметь большой объем пустот, который придется заполнять цементным тестом, что увеличивает себестоимость бетона. Поэтому для полной характеристики песка важна величина его пустотно-

сти. Песок, отсеянный на ситах двух близких номеров, т. е. состоящий из зерен почти одинаковой крупности, имеет большую пустотность (40...47%). При наилучшем сочетании в песке крупных, средних и мелких зерен пустотность может быть уменьшена до 30%. В доброкачественном песке пустотность не должна превышать 38%.

Для бетона наиболее пригоден крупный песок, содержащий достаточное количество средних и мелких зерен. При такой комбинации зерен объем пустот будет малым, а площадь поверхности зерен — небольшая. Этот оптимальный состав песка соответствует заштрихованной полосе на рис. 2.6.

Плотность песка зависит от его истинной плотности, пустотности и влажности и определяется в сухом рыхлом состоянии. Песок, предназначенный для бетона М200 (класс 12,5) и выше или для бетона в конструкциях, подвергающихся замерзанию в насыщенном водой состоянии, должен иметь плотность не ниже 1550 кг/м³; в остальных, более простых случаях не ниже 1400 кг/м³. При встряхивании песок уплотняется и плотность его увеличивается до 1600...1700 кг/м³. Самый большой объем песок занимает при влажности около 5...7%; с повышением или с понижением влажности объем песка уменьшается (рис. 2.7). Это свойство следует учитывать при его приемке и дозировке (по объему) для приготовления бетона.

● Гравий называют рыхлый материал, образовавшийся в результате естественного разрушения (выветривания) горных пород. Гравий состоит из более или менее окатанных зерен размером 3...70 мм. В нем могут содержаться зерна высокой прочности, например гранитные, и слабые зерна пористых известняков. Обычно он содержит примеси пыли, глины, иногда и органических веществ, а также песка. При большом содержании песка такой материал называют песчано-гравийной смесью или гравелистым песком.

Для бетона желательна малоокатанная (щебневидная) форма зерен гравия; малопригодная яйцевидная (окатанная), еще хуже — пластичная или лещадная с шириной, в три раза и более превы-

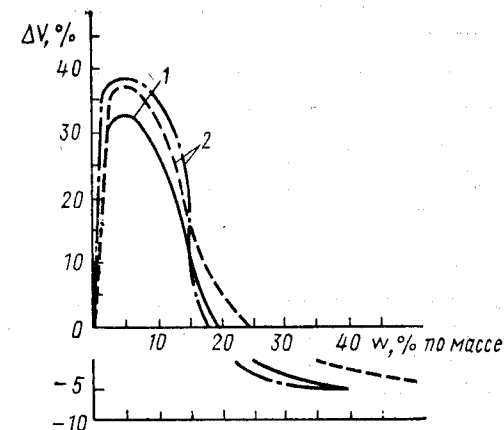


Рис. 2.7. Зависимость увеличения объема песка ΔV от его влажности w :
1 — для крупного песка; 2 — для мелкого песка

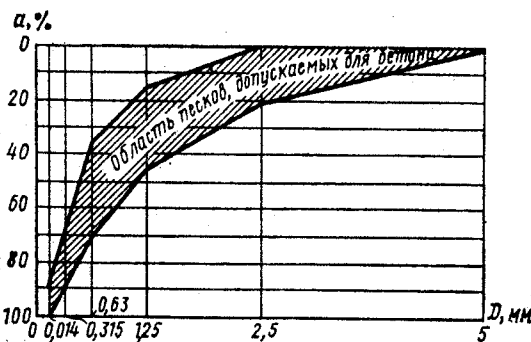


Рис. 2.6. Зерновой состав песка:

a — полные остатки; D — размер отверстий контрольных сит

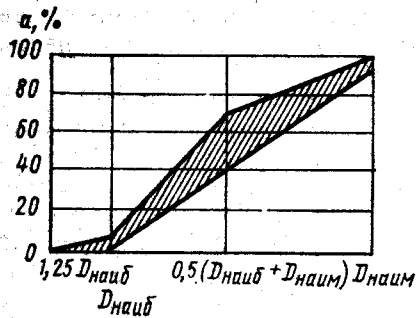


Рис. 2.8. Зерновой состав гравия (щебня)

5 (или 3) мм. При изготовлении бетона большое значение имеет максимально допускаемая крупность гравия, определяемая размером отверстия сита, на котором полный остаток не превышает 5% от общей навески. Максимальная крупность зависит от размера бетонизируемых конструкций: для удобной укладки бетонной смеси нельзя применять гравий крупнее $\frac{1}{4}$ минимального размера сечения конструкции и больше минимального расстояния между стержнями арматуры в железобетонной конструкции (например, для балки шириной 200 мм можно использовать гравий с наибольшей величиной зерен $200/4=50$ мм); при бетонировании плит, полов и покрытий — $\frac{1}{2}$ толщины плиты, при бетонировании массивных сооружений с редкой арматурой — 120 ... 150 мм.

После просеивания гравия определяют частные остатки (%) на каждом сите начиная с наибольшего, затем вычисляют полные остатки. Результаты просеивания гравия обычно наносят на график. Зерновой состав гравия должен располагаться по возможности в пределах заштрихованной площади (рис. 2.8). Для бетона желателен в основном крупный гравий, но с достаточным содержанием средних и мелких зерен. Подвижность бетонной смеси одинакового состава и с одинаковым количеством воды при крупном гравии больше, чем при мелком. Пустотность гравия не должна превышать 45%. На изменение объема гравия в отличие от песка влажность почти не влияет. Прочность зерен гравия должна обеспечивать получение бетона, прочность которого на 20 ... 50% превышает заданную.

Гравий считается морозостойким, если в насыщенном водой состоянии он выдерживает без разрушения многократное попеременное замораживание при -15°C и оттаивание, причем суммарная потеря в массе зерен должна быть не более 10%, а при морозостойкости выше 50 циклов — не более 5%. Морозостойкость требуется от гравия только в том случае, если он предназначен для бетонных сооружений, подвергающихся многократным заморажи-

вающей толщину. Игловатых и пластинчатых зерен в составе гравия должно быть не более 15% (по массе).

В зависимости от величины зерен различают гравий следующих видов: рядовой — 3 ... 70 мм; фракционированный: особо мелкий — 5 ... 10 или 3 ... 10 мм, мелкий — 2 ... 20, средний — 20 ... 40, крупный — 40 ... 70 мм.

Крупность гравия определяют просеиванием его через стандартный набор сит с круглыми отверстиями размером 70, 40, 20, 10 и

ванию и оттаиванию. В суровых климатических условиях гравий должен выдерживать не менее 100 ... 200 циклов замораживания и оттаивания, в умеренных — 50, в мягких — 15 ... 25.

Допускается ускоренное испытание на морозостойкость путем переменного насыщения в растворе сернокислого натрия и высушивания. Требуемое число циклов в этом случае 5 ... 10 ... 15 соответствует F25 ... 50 ... 200 при обычном испытании замораживанием и оттаиванием. Если потеря в массе зерен гравия составит не более 10 ... 5 ... 3%, то материал признается годным. При получении же неудовлетворительных результатов необходимо испытать гравий на морозостойкость обычным способом.

В гравии допускается не более 1% (по массе) глинистых, илистых, пылевидных примесей, количество которых определяют отмучиванием. Содержание органических примесей в гравии устанавливают, как в песке, колориметрическим методом. Если в гравии количество примесей больше допустимого, то его промывают водой.

В природе встречаются готовые смеси песка и гравия. В этих случаях необходимо проверять постоянство состава и соответствие песчаной и гравийной частей существующим стандартам. Если состав смеси пригоден для бетона и сохраняется неизменным, то смесь можно не рассевать, но чаще всего смеси по составу не постоянны и их приходится разделять на песок и 2 ... 3 фракции гравия.

● *Щебнем называют материал, полученный в результате дробления камней из горных пород.* Щебень имеет остроугольную форму. Для приготовления бетона лучше всего использовать щебень, близкий по форме к кубу или тетраэдру; плоская форма значительно хуже, так как она легко ломается. Форма щебня зависит от структуры каменной породы и типа камнедробильной машины.

Для производства щебня используют гранит, диабаз и другие изверженные породы, а также плотные осадочные породы — известняк, доломит и измененные породы — кварцит. Наиболее широко в строительстве применяют известняковый и гранитный щебень.

К крупности, зерновому составу, прочности и морозостойкости щебня предъявляют те же требования, что и к гравию. Щебень чище гравия, обычно он не содержит органических примесей. Предельное содержание глинистых и пылевидных примесей допускается: для бетонов М300 (В25) и выше — 1% в щебне из изверженных пород и 2% в щебне из карбонатных пород; для бетонов более низких марок — соответственно 3 ... 2% (по массе).

Для обычного бетона можно применять щебень только из каменных пород, прочность которого выше заданной марки (класса) бетона, а именно: необходимая прочность исходной каменной породы (в насыщенном водой состоянии) $R_{щ} > 2R_b$ для бетона М300 (В25) и выше и $R_{щ} > 1,5R_b$ для бетонов более низких марок. Для бетона в конструкциях, подвергающихся насыщению водой и замо-

раживанию, желательно применять щебень водопоглощением не более 3% (по массе), а без замораживания — не более 5%.

Для приготовления легких бетонов используют легкие пористые заполнители: 1) щебень из пористых горных пород (пемзы, вулканических туфов и лав, известковых туфов, ракушечников и т. п.); 2) отходы промышленности: а) топливные (котельные) шлаки, т. е. отходы от сжигания угля; б) гранулированные доменные шлаки; в) зольный гравий из золы ТЭЦ; 3) специально изготавливаемые (искусственные) пористые заполнители: а) керамзит, получаемый в результате вспучивания глин, глинистых сланцев и подобного сырья при ускоренном режиме обжига (керамзитовый гравий, щебень и песок); б) шлаковую пемзу (термозит) — пористые доменные шлаки, вспученные под действием водяного пара и раздробленные на щебень и песок; в) агломерированные шлаки, получаемые спеканием зол или топливных шлаков на особых спекательных устройствах (аглопорит); г) вспученные при обжиге горные породы (перлит, шунгезит).

Искусственные пористые заполнители отличаются более высокими качествами, чем обычные топливные шлаки, и позволяют получать более прочные, стойкие и легкие бетоны.

Легкие (пористые) заполнители должны иметь плотность в насыпном состоянии менее $\rho_n = 1000 \text{ кг/м}^3$, чаще же всего $\rho_n = 500 \dots 800 \text{ кг/м}^3$, т. е. примерно вдвое меньше, чем у обычного песка и гравия. Вследствие большой пористости прочность легких заполнителей значительно меньше, а поверхность их значительно больше, чем у обычного песка и гравия или щебня.

Таблица 2.6. Свойства легких заполнителей

Заполнитель	Насыпная плотность, кг/м^3	Предел прочности при сжатии в куске, МПа
Щебень из:		
обычной природной пемзы	400...600	1,0...3,5
туфов легких	700...800	5,0...10
ракушечников легких	700...800	1,0...2,5
Шлаковая пемза (из вспученных доменных шлаков):		
легкая	400...600	2,5...10
средняя	700...800	5,0...20
Керамзитовый гравий (из вспученных глин):		
легкий	300...400	2,5...10
средний	500...700	5,0...20
Керамзитовый песок	600...800	—
Агломерированные (или вторичные) шлаки (щебень из спекшихся шлаков и зол)	600...1000	2,5...10
Гранулированные доменные шлаки:		
легкие	500...600	—
средние	800...1000	—
Вспученные горные породы (перлит)	200...800	0,5...1,5

Основные показатели плотности и прочности важнейших видов легких заполнителей приведены в табл. 2.6.

При расчете составов легкого бетона используют понятие плотности в куске, т. е. плотности зерен легкого заполнителя с учетом их пористости. Плотность в куске легких заполнителей в зависимости от вида заполнителя может колебаться от 0,7 до 1,8 г/см^3 .

Истинная плотность пористых заполнителей составляет 2,6...

... 2,7 г/см^3 . Общая пористость легких заполнителей 40 ... 75%, причем большинство пор обычно сообщаются между собой и открыты для доступа воды. Закрытая пористость не превышает 10 ... 20%. Пустотность легких пористых заполнителей зависит от их зернового состава и, как и для обычных песка и щебня, составляет 30 ... 45%. В легких бетонах используют крупный пористый заполнитель (гравий или щебень) стандартных фракций 5 ... 10, 10 ... 20, 20 ... 40 мм и легкий песок, получаемый дроблением крупных фракций заполнителя или обжигом в печах кипящего слоя (для керамзитового песка).

Зерновой состав песка должен соответствовать рекомендациям рис. 2.9 (1 — желательный, 2 — допустимый). Зерна дробленого песка не имеют спекшейся оболочки и поэтому обладают повышенной водопотребностью и пониженной прочностью. Кроме того, выход дробленого песка из 1 м^3 гравия составляет всего 0,4 ... 0,7 м^3 , что приводит к удорожанию материала.

Пористая структура заполнителей значительно снижает их прочность (обычно в 50 ... 100 раз). Ориентировочно прочность керамических пористых заполнителей типа керамзита можно определять по формуле

$$R_3 = 150\rho^2. \quad (2.9)$$

Опытным путем прочность пористых заполнителей определяют сдавливанием в стальном цилиндре диаметром 150 мм. При этом получают условную прочность материала (дробимость). Действительная прочность зерен заполнителя превышает условную: для керамзита — в 3 ... 5 раз, аглопорита — в 20 ... 30 раз.

Между показателем дробимости $R_{др}$ и насыпной плотностью существует ориентировочная статистическая зависимость

$$R_{др}/\rho_n^2 = 22. \quad (2.10)$$

Влияние легкого заполнителя на свойства бетона определяется всем комплексом его свойств, особенностями строения, составом

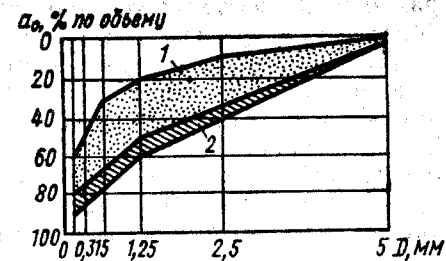


Рис. 2.9. Зерновой состав пористого песка:

α_0 — полные остатки по объему

бетона. Большое влияние оказывает не только общий объем пористости, но ее характер: мелкопористые заполнители позволяют получать бетоны более прочные и экономичные по расходу цемента. Наличие более плотной и прочной наружной оболочки на зернах некоторых заполнителей, например керамиита, улучшает свойства заполнителя и эффективность его применения в бетоне. В последние годы проводятся работы по уменьшению водопоглощения легкого заполнителя путем поверхностной обработки его полимерами или гидрофобизирующими веществами, что также способствует экономии цемента в легких бетонах.

Существующие стандартные испытания дают в основном качественную оценку заполнителя и отвечают лишь на вопрос, пригоден ли данный заполнитель для бетона заданной марки (класса). Для количественной оценки влияния, заполнителя на свойства и экономичность бетона (не касаясь частных случаев, таких, как влияние заполнителя на морозостойкость, усадку и т. д.) необходимо знать влияние данного заполнителя на подвижность или водопотребность бетонной смеси, а также на прочность бетона при сжатии.

Если подобное влияние выразить какой-либо количественной характеристикой заполнителя, то можно было бы значительно уточнить технологические и технико-экономические расчеты, эффективнее использовать ЭВМ. Б. Г. Скрамтаевым и Ю. М. Баженовым был предложен способ испытания заполнителя непосредственно в бетоне, что обеспечивает получение наиболее достоверных технологических характеристик заполнителя: водопотребности и коэффициента прочности песка (или щебня).

Эти характеристики, являющиеся интегральными количественными показателями влияния заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона, определяют путем сравнительных испытаний цементного теста, растворной и бетонной смеси. Для определения водопотребности песка V_n вначале устанавливают $(В/Ц)_ц$ цементного теста, при котором оно показывает на встряхивающем столике расплыв конуса около 170 мм, что приблизительно соответствует его нормальной густоте. Затем определяют $(В/Ц)_р$ растворной смеси 1:2 на исследуемом песке, при которой она имеет тот же расплыв конуса (170 мм) на встряхивающем столике. Водопотребность песка (%) находят по формуле

$$V_n = \frac{(В/Ц)_р - (В/Ц)_ц}{2} \cdot 100. \quad (2.11)$$

В знаменателе представлено количество частей песка, приходящихся на одну часть цемента, так как V_n характеризует водопотребность единицы массы заполнителей. Водопотребность песка показывает, сколько требуется добавить воды при введении песка в цементное тесто, чтобы сохранить показатель подвижности.

При испытании цемента часто используют стандартный вольский песок, имеющий относительно стабильный состав и гранулометрию. Водопотребность этого песка 4%. Водопотребность любого песка можно определить, установив $(В/Ц)_р$ на исследуемом и $(В/Ц)_р.с$ стандартном песках, при которых достигается одинаковая подвижность (жесткость) смеси. В этом случае

$$V_n = \frac{(В/Ц)_р - (В/Ц)_р.с}{2} \cdot 100 + 4. \quad (2.12)$$

Водопотребность щебня устанавливают путем сравнительных испытаний растворной и бетонной смеси. При этом определяют $(В/Ц)_б$ бетонной смеси, при которой достигается та же подвижность (жесткость), что имеет растворная смесь с $(В/Ц)_р$. Для испытаний применяют состав бетонной смеси 1:2:3,5. Водопотребность щебня (%) находят по формуле

$$V_{щ} = \frac{(В/Ц)_б - (В/Ц)_р}{3,5} \cdot 100. \quad (2.13)$$

Поскольку водопотребность смеси фракций заполнителей подчиняется правилу аддитивности и мало изменяется при небольших колебаниях $В/Ц$ затворения, можно определить V_n и $V_{щ}$ путем сравнительных испытаний нескольких составов бетонной смеси, имеющих различное (в пределах 10...15%) содержание песка и щебня, но одинаковую подвижность.

В результате испытаний различных заполнителей было установлено, что водопотребность песка составляет 4...14%, а крупного заполнителя — 1...10%. Крупнозернистые пески имеют $V_n = 4...6\%$, пески средней крупности — 6...8, мелкозернистые пески — 8...10 и очень мелкие пески — более 10%. Стандартный вольский песок имеет $V_n = 4\%$. Водопотребность гравия 1...4%, щебня из плотных изверженных пород 2...6, щебня из карбонатных пород (с учетом водопоглощения) 5...10%.

Результаты опытов показывают, что водопотребность заполнителей колеблется в широких пределах и для того, чтобы технологические расчеты, в частности расчеты состава бетона, были более точными, необходимо учитывать в них новую характеристику заполнителя — его водопотребность. Действительная водопотребность заполнителя в бетоне значительно выше тех значений (порядка 1...2%), которые иногда раньше вводили в расчет для учета смазывания заполнителя.

Для оценки влияния легкого заполнителя на расход воды и другие свойства бетонной смеси также используют понятие о его водопотребности. Наиболее показательна полная водопотребность, которая учитывает не только влияние поверхности заполнителя на цементное тесто, но и водопоглощение из цементного теста, которое зависит от состава бетона и обычно составляет 50...70% от

полного водопоглощения. Водопотребность легкого песка и щебня определяют в растворе и бетоне через 30 мин после их изготовления. Водопотребность легких заполнителей колеблется в широких пределах и может достигать для песка 30%, а для щебня — 20%.

Влияние заполнителя на прочность раствора и бетона можно приблизительно оценить по результатам испытаний раствора и бетона, приготовленных на исследуемых заполнителях (при прочих равных условиях), и по значению коэффициента прочности A в известной формуле прочности бетона

$$A = \frac{R_{0(p)}}{R_{ц} \left(\frac{Ц}{В} \right) - 0,5} \quad (2.14)$$

Влияние песка на прочность раствора и мелкозернистого бетона оценивают по результатам испытания образцов из раствора в возрасте 28 сут. Влияние щебня — по результатам испытания бетонных образцов, так как в бетоне влияние песка на прочность материала обычно незначительно. Коэффициент прочности A для разных заполнителей изменяется весьма заметно. Для песков этот коэффициент колеблется от 0,3 до 0,68, для щебня и гравия — от 0,34 до 0,75. Однако на значение коэффициента прочности заполнителя сильнее, чем на его показатель водопотребности, влияют различные технологические факторы, что снижает точность этой характеристики. Для ее успешного применения необходимо дальнейшее совершенствование методики, например переход к эталонным составам бетона.

В табл. 2.7 приведены стандартные и технологические характеристики некоторых заполнителей. Данные таблицы подтверждают полезность использования технологических характеристик. Заполнители с очень близкими стандартными характеристиками могут иметь разные технологические характеристики и по-разному влиять на подвижность бетонной смеси и прочность бетона.

Таблица 2.7. Стандартные и технологические характеристики некоторых заполнителей

Заполнитель	Истинная плотность, г/см ³	Плотность, кг/л	Пустотность, %	Модуль крупности $M_{кр}$	Водопотребность, %	Коэффициент прочности
Щебень из изверженных пород	2,69	1,45	45,7	—	3,43	0,50
	2,6	1,47	42,6	—	5,88	0,59
Известняковый щебень	2,56	1,34	45,6	—	6,72	0,63
Строительный песок	2,63	1,51	42,5	2,79	7	0,53
	2,7	1,37	49	0,69	11,5	0,25
Вольский песок	2,65	1,56	41	2,05	4	0,32

§ 2.3. ДОБАВКИ К БЕТОНАМ

● Для регулирования свойств бетона, бетонной смеси и экономии цемента применяют различные добавки. Их подразделяют на два вида: химические добавки, вводимые в бетон в небольшом количестве (0,1 ... 2% от массы цемента) и изменяющие в нужном направлении свойства бетонной смеси и бетона, и тонкомолотые добавки (5 ... 20% и более), используемые для экономии цемента, получения плотного бетона при малых расходах цемента и повышения стойкости бетона. Применение химических добавок является одним из наиболее универсальных, доступных и гибких способов управления технологией бетона и регулирования его свойств. Планы развития строительной индустрии предусматривают значительное расширение производства бетонных смесей с использованием эффективных добавок, применение новых видов добавок.

■ Химические добавки классифицируют по основному эффекту действия: 1) регулирующие свойства бетонных смесей; пластифицирующие, т. е. увеличивающие подвижность бетонной смеси; стабилизирующие, т. е. предупреждающие расслоение бетонной смеси; водоудерживающие, уменьшающие водоотделение; 2) регулирующие схватывание бетонных смесей и твердение бетона: ускоряющие или замедляющие схватывание, ускоряющие твердение, обеспечивающие твердение при отрицательных температурах (противоморозные); 3) регулирующие плотность и пористость бетонной смеси и бетона, воздухововлекающие, газообразующие, пенообразующие, уплотняющие (воздухоудаляющие и кольматирующие поры бетона), гидрофобизирующие; добавки — регуляторы деформаций бетона, расширяющие добавки; 4) повышающие защитные свойства бетона к стали, ингибиторы коррозии стали; 5) придающие бетону специальные свойства: гидрофобизирующие, т. е. уменьшающие смачивание бетона; антикоррозионные, т. е. повышающие стойкость в агрессивных средах; красящие; повышающие бактерицидные и инсектицидные свойства, электроизоляционные, электропроводящие, противорадиационные.

Некоторые добавки обладают полифункциональным действием, например пластифицирующие и воздухововлекающие, газообразующие и пластифицирующие и др. В этом случае добавку классифицируют по наиболее выраженному эффекту действия.

Большое значение имеет эффективность воздействия добавки на бетонную смесь или бетон, которую обычно оценивают по величине максимального технического эффекта, достигаемого при введении данной добавки. Добавки одного класса могут заметно различаться по эффективности. В этом случае применяют дополнительную классификацию добавок по группам, обладающим определенной эффективностью. Например, добавки пластификаторы делят на четыре группы или категории по эффективности (табл. 2.8).

Таблица 2.8. Классификация пластификаторов

Категория	Группа	Эффективность действия	
		изменение осадки, см	уменьшение водопотребности равноподвижных смесей, %
I	Суперпластификатор	От 2...3 до 20	Не менее 20
II	Сильный пластификатор	От 2...3 до 14...20	» 10
III	Средний пластификатор	От 2...3 до 8...14	» 5
IV	Слабый пластификатор	От 2...3 до 6...8	Менее 5

Пластификаторы бетонных смесей начали широко применяться в 40...50-х годах, и сегодня они занимают ведущее место среди химических добавок, применяемых в технологии бетона. В качестве пластифицирующих добавок широко используют поверхностно-активные вещества (ПАВ), нередко получаемые из вторичных продуктов и отходов химической промышленности. ПАВ делят на две группы: I группа — пластифицирующие добавки гидрофильного типа, способствующие диспергированию коллоидной системы цементного теста и тем самым улучшающие его текучесть; II группа — гидрофобизирующие добавки, вовлекающие в бетонную смесь мельчайшие пузырьки воздуха. Молекулы поверхностно-активных гидрофобных добавок, адсорбируясь на поверхности раздела воздух — вода, понижают поверхностное натяжение воды и стабилизируют мельчайшие пузырьки воздуха в цементном тесте. Добавки II группы, имея основным назначением регулирование структуры и повышение стойкости бетона, обладают при этом заметным пластифицирующим эффектом.

Из добавок I группы наиболее широко применяют сульфитно-дрожжевую бражку (СДБ). Эта добавка представляет собой кальциевые соли лигносульфонных кислот. Получают ее в виде жидкости из сульфитных щелоков, образующихся при переработке целлюлозы. Выпускают также пластификатор адипиновый щелочный (ПАЩ-1), упаренную последрождевую барду (УПБ), пластификатор ВРП-1 и др.

К добавкам II группы относят: смолу нейтрализованную воздухововлекающую (СНВ); натриевую соль абиетиновой кислоты, получаемую в виде порошка или жидкости путем омыления канифоли едким натром; омыленный древесный пек (препарат ЦНИИПС-1) — пасту, получаемую нейтрализацией едким натром жидких кислот древесного пека; смолу древесную омыленную (СДО), синтетическую поверхностно-активную добавку (СПД), получаемую из отходов нефтепереработки, и др.

В обычных бетонах в качестве пластификатора широко используют СДБ. СДБ повышает подвижность бетонной смеси, ее одно-

родность, текучесть при перекачивании насосом, способствует сохранению удобоукладываемости смеси во времени, позволяет за счет уменьшения расхода воды сократить на 8...12% расход цемента либо при неизменном расходе цемента понизить водоцементное отношение и несколько повысить прочность бетона, его водонепроницаемость и морозостойкость. СДБ несколько замедляет твердение бетона в раннем возрасте, поэтому при производстве сборного железобетона ее применяют в сочетании с добавками — ускорителями твердения цемента; уменьшает тепловыделение цемента в первые дни твердения, что облегчает возведение массивных железобетонных сооружений; СДБ в основном воздействует на цементное тесто, поэтому наиболее эффективно ее применение в бетонах с достаточно высоким расходом цемента.

Воздухововлекающие добавки используют главным образом для повышения морозостойкости бетонов и растворов. Эти добавки несколько понижают прочность бетона (1% вовлеченного воздуха снижает прочность бетона на сжатие на 3%), поэтому не следует в бетонную смесь с целью ее пластификации вводить большое количество воздухововлекающей добавки. Содержание вовлеченного воздуха составляет обычно 4...5%. В этом случае прочность бетона практически не снижается, так как отрицательное влияние вовлеченного воздуха нейтрализуется повышением прочности цементного камня вследствие уменьшения водоцементного отношения за счет пластифицирующего эффекта добавки. Воздухововлекающая добавка гидрофобизирует поры и капилляры бетона, а воздушные пузырьки служат резервным объемом для замерзания воды без возникновения больших внутренних напряжений. В результате значительно повышаются водонепроницаемость и морозостойкость бетона. Воздухововлекающие добавки более эффективны в бетонах с малыми расходами цемента.

К гидрофобно-пластифицирующим добавкам относят также кремнийорганические жидкости: метилсиликонат натрия (ГКЖ-11), этилсиликонат натрия (ГКЖ-10) и этилгидросилоксановую жидкость (ГКЖ-94). Применяют их для увеличения стойкости бетонов и растворов в агрессивной среде, повышения долговечности бетона, а также в качестве гидрофобизаторов поверхности ячеистых бетонов.

В последнее время разработаны и внедряются в строительство новые химические добавки — суперпластификаторы (СП). Эти добавки в большей степени, чем ранее применявшиеся пластификаторы (см. табл. 2.8), увеличивают подвижность и текучесть бетонной смеси, существенно улучшают строительные-технологические свойства бетона, могут обеспечить значительную экономию цемента. В большинстве суперпластификаторы — синтетические полимерные вещества, которые вводят в бетонную смесь в количестве 0,1...1,2% от массы цемента. Действие суперпластификаторов, как правило, ограничено 2...3 ч с момента введения их в бетонную

смесь. Вместе с тем СП не замедляют твердения бетона, так как адсорбционный слой добавки на поверхности зерен цемента проницаем для воды, а ее дефлокулирующее действие увеличивает поверхность контакта цемента и воды и число новообразований. В результате после первоначального замедления гидротации и образования коагуляционной структуры наступает ускорение твердения бетона. Введение суперпластификаторов особенно эффективно для производства сборного железобетона, где увеличение скорости твердения бетона имеет важное значение и где применение обычных пластификаторов, часто замедляющих твердение, требует применения специальных мер: введения в бетонную смесь одновременно ускорителей твердения, мягких режимов тепловой обработки и др. Применение суперпластификаторов позволяет эффективно применять бетоны с низкими В/Ц и получать высокую прочность (60 ... 80 МПа) более просто, чем при использовании других технологических приемов; шире использовать литьевой способ изготовления сборного железобетона или укладку бетонной смеси с пониженными В/Ц с помощью кратковременной вибрации, успешно бетонировать конструкции сложного профиля, сократить время формирования изделий, повысить качество лицевых поверхностей, уменьшить расход цемента.

Суперпластификаторы по своей природе можно условно разделить на четыре группы: 1) сульфированные меламинаформальдегидные смолы и комплексные добавки на их основе, 2) продукты конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида и комплексные добавки на их основе, 3) модифицированные (очищенные и практически не содержащие сахаров) лигносульфаты и комплексные добавки на их основе, 4) продукты конденсации окскарбоновых кислот и некоторые другие добавки. Некоторые из выпускаемых промышленностью пластификаторов приведены в табл. 2.9. В нашей стране наибольшее распространение получил пластификатор С-3.

Необходимо отметить, что некоторые суперпластификаторы, изготавливаемые из вторичного сырья промышленности, например 40-03, могут несколько замедлять твердение бетона, что вынуждает ограничивать дозировку добавки.

В качестве ускорителей твердения применяют хлорид кальция (ХК), сульфат натрия (СН), нитрит-нитрат-хлорид кальция (ННХК) и др. При этом необходимо учитывать побочное действие этих добавок. Например, хлорид кальция способствует коррозии арматуры, поэтому количество его в железобетоне ограничивается 2%, не допускают его применения в конструкциях с тонкой и предельно напряженной арматурой, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях. Сульфат натрия может вызвать появление высолов на поверхности конструкций, что требует специальных предохранительных мер. В нитрит-нитрат-хлориде кальция ускоряющие действия хлорида сочетаются с ингибирующим действием

Таблица 2.9. Суперпластификаторы

Группа	Наименование	Страна-изготовитель	Основной разработчик
I	10-03	СССР	ВНИИжелезобетон
	КМ-30	СССР	ЦНИИЭПжилища
II	ВС (МФАС-Р100-П, МФАР)	СССР	НИИЖБ
	НИЛ-10	СССР	ЦНИЛ ФХМми ТП
	Мельмент	ФРГ	—
	Компласт	Великобритания	—
	С-3	СССР	НИИЖБ
III	40-03	СССР	ВНИИжелезобетон
	Дофен	СССР	Донецкий промстрой-НИИпроект
	Майти	Япония	—
	Кормикс	Великобритания	—
	Ломар Д	США	—
IV	ЛСТМ	СССР	НИИцемент
	ХДС	СССР	ХИСИ
	Позолиш 300N	Япония, США, ЮАР	—
IV	Хрис флюид	Франция	—
	Пластимент BV40	Великобритания, Франция	—

нитрата кальция, что несколько снижает опасность коррозии арматуры.

В последнее время появились бесхлоридные ускорители твердения: алюминаты, формиат кальция, карбонаты, галоиды, триэтаноламин, формальдегид и другие, повышающие прочность бетона в возрасте 7 сут на 20 ... 40%. Можно ожидать дальнейшего развития этого направления в ближайшие годы.

В качестве противоморозных добавок применяют поташ (П), хлорид натрия (ХН), хлорид кальция (ХК) и др. Эти добавки понижают точку замерзания воды и способствуют твердению бетона при отрицательных температурах. Чем ниже температура твердения, тем выше дозировка добавки (до 10% массы цемента и больше).

В качестве газообразующей добавки широко используют алюминиевую пудру (ПАК) и ГКЖ-94. Наоборот, для уплотнения структуры бетона добавляют нитрат кальция (НК), хлорид и сульфат железа (ХЖ и СЖ), сульфат алюминия (СА), диэтиленгликолиевую ДЭГ-1 или триэтиленгликолиевую ТЭГ-1 смолы. Для замедления схватывания применяют сахарную патоку (СП) и добавки СДБ, ГКЖ-10 и ГКЖ-94 в повышенных дозировках.

Для гидрофобизации бетона, повышения его стойкости в агрессивной среде и долговечности применяют гидрофобно-пластифицирующие кремнийорганические жидкости: метилсиликонат натрия ГКЖ-11, этилсиликонат натрия ГКЖ-10, этилгидросилоксановую

жидкость ГКЖ-94. Для уплотнения структуры бетона используют FeCl_3 , в качестве ингибиторов коррозии — нитрит натрия, бихромат калия, для улучшения противорадиационных свойств — соли тяжелых металлов, для повышения электропроводности — кокс, для придания бактерицидных свойств — ОСС. Перечисленные добавки не исчерпывают всего многообразия имеющихся сегодня в арсенале технолога модификаторов бетона. Умелое пользование ими обеспечивает значительное повышение качества бетона и экономии ресурсов при его изготовлении.

Химические добавки поставляются в виде водных растворов, порошков и эмульсий. Большинство добавок растворимы в воде, и их вводят в бетоносмеситель в виде предварительно приготовленного раствора. Некоторые добавки вводят в виде эмульсии (ГКЖ-94) или в виде взвесей в воде (ПАК). Оптимальная дозировка добавки зависит от вида цемента, состава бетонной смеси, технологии изготовления конструкции. Обычно применяют (% от массы цемента): пластифицирующих добавок — 0,1 ... 0,3; суперпластификаторов — 0,5 ... 1; воздухововлекающих добавок — 0,01 ... 0,05; ускорителей твердения — 1 ... 2. На практике оптимальную дозировку добавки определяют опытным путем.

Для получения эффекта полифункционального действия применяют комплексные добавки, включающие несколько компонентов, например добавки, одновременно пластифицирующие бетонную смесь и ускоряющие твердение бетона, и др. Разработано большое количество разнообразных комплексных добавок, позволяющих осуществлять действенное управление свойствами и технологией бетона. Комплексные добавки условно можно разделить на пять групп: смеси поверхностно-активных веществ (I), смеси электролитов (II), смеси поверхностно-активных веществ и электролитов (III), комплексные добавки на основе суперпластификаторов (IV), сложные многокомпонентные комплексные добавки (V).

В комплексных добавках I группы наиболее часто применяют сочетание пластифицирующих компонентов диспергирующего действия и гидрофобизирующих воздухововлекающих (СДБ+СНВ, ПАЩ+СПД) или гидрофобизирующих газообразующих компонентов (СДБ+ГКЖ-94). Первые хорошо пластифицируют жирные бетонные смеси с высоким расходом цемента, вторые, наоборот, тощие бетонные смеси. Комплексные же добавки отличаются универсальным пластифицирующим действием на бетонные смеси разного состава.

На эффективность добавок поверхностно-активных веществ определенное влияние оказывает их способность по-разному адсорбироваться на клинкерных минералах цемента. По данным В. Н. Юнга и Б. Д. Тринкера, по адсорбционной способности к лигносульфонату кальция минералы располагаются в следующем порядке: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_2\text{S}$. В противоположность гидрофилизующим гидрофобизирующие ПАВ хорошо адсорбируются (хе-

мосорбируются) на силикатных и плохо — на алюминатных составляющих клинкера. По данным М. И. Хигеревича и В. Е. Байера, гидрофобные ПАВ совершенно не осаждаются на C_3A , но прочно фиксируются на C_4AF , C_2S и C_3S .

Вследствие различия в сорбционной способности к минералам цементного клинкера добавки показывают разную степень эффективности при использовании различных по минералогическому составу цементов. СДБ оказываются более эффективны при применении алюминатных цементов, а гидрофобные добавки — при применении цементов с повышенным содержанием силикатов кальция.

В комплексных гидрофобно-пластифицирующих добавках отдельные компоненты как бы дополняют друг друга, делая добавки более универсальными по отношению к цементам разного минералогического состава.

Хорошо пластифицируя бетонную смесь, комплексные добавки I группы одновременно изменяют в нужном направлении структуру бетона и ее свойства. В результате в 2 ... 5 раз увеличивается морозостойкость бетона, на 1 ... 2 марки — его водонепроницаемость, повышается его коррозионная стойкость. Заданная подвижность бетонной смеси сохраняется в течение 2 ... 3 ч, что особенно важно при транспортировании смеси на большие расстояния и при бетонировании в условиях сухого жаркого климата. В ряде случаев на 5 ... 10% сокращается расход цемента для получения бетона с заданными техническими показателями.

Сочетание ПАВ с различным механизмом воздействия на бетонную смесь может способствовать повышению общего пластифицирующего эффекта. Например, введение в раствор СДБ кубовых остатков синтетических жирных кислот (КОСЖК) или кубовых остатков высших жирных спиртов (КОВЖС) способствует снижению воздухововлечения и тем самым позволяет увеличить дозировку СДБ и соответственно подвижность бетонной смеси.

Интересным новым направлением является сочетание пластифицирующего и стабилизирующего компонентов, например СДБ и полиоксидэтилена (ПОЭ) или СДБ и метилцеллюлозы (МЦ). Эти добавки позволяют получать бетонные смеси с повышенной связностью, что способствует транспортированию бетонной смеси по лоткам и трубопроводам, изготовлению изделий методом экструзии, обеспечивают нерасслаиваемость легких бетонных смесей.

Вместе с тем комплексные добавки I группы несколько замедляют гидратацию цемента, что необходимо учитывать при изготовлении конструкций. Бетон с такими добавками следует выдерживать не менее 2 ч до тепловой обработки, скорость подъема температуры не должна превышать 15 ... 20 °С/ч, а общая продолжительность тепловлажностной обработки должна составлять не менее 13 ч для бетонов на портландцементях и не менее 14 ч для бетонов на шлако- и пуццолановых цементях.

Комплексные добавки II группы, включающие ПАВ и электро-

литы, расширяют возможность модификации бетона и бетонной смеси. Введением электролитов регулируется темп твердения и улучшаются структурно-механические свойства бетона, например повышается его плотность, а ПАВ позволяют регулировать подвижность бетонной смеси, ее воздухосодержание, придают бетону некоторые специальные свойства (гидрофобность и др.).

В технологии бетона используют добавки СДБ+СН, СДБ+ННХК, СДБ+ГКЖ-94+СН, ГКЖ-10+НК и др. Сочетание СДБ с СН или ННХК обеспечивает достаточный темп твердения бетона и положительно влияет на его плотность и непроницаемость, позволяя оновременно экономить 8 ... 15% цемента за счет снижения водопотребности бетонной смеси. При сохранении его заданной подвижности сочетание с электролитами кремнийорганических соединений обеспечивает высокую морозостойкость и коррозионную стойкость бетона.

Вместе с тем, проектируя комплексные добавки II группы, необходимо учитывать, что некоторые компоненты могут обладать не совместимостью. Например, некоторые ПАВ образуют с кальциевыми и алюминиевыми солями труднорастворимые соединения; электролиты в ряде случаев снижают эффективность воздухововлекающих добавок и т. д. Иногда, чтобы уменьшить отрицательное влияние несовместимости отдельных компонентов комплексной добавки, применяют их раздельное введение в бетонную смесь, что усложняет технологию и приводит к дополнительным затратам.

В комплексных добавках III группы сочетание электролитов с разным механизмом воздействия на бетонную смесь и бетон позволяет устранить недостатки некоторых однокомпонентных добавок и добиться полифункционального эффекта. Например, сочетание ускорителей твердения и ингибиторов (ННХК; ХК+НН, НК) уменьшает опасность коррозии арматуры в железобетонных конструкциях, а сочетание поташа и алюмината натрия регулирует сроки схватывания бетонной смеси. Наиболее широко комплексные добавки II группы используют при зимнем бетонировании.

Особое развитие комплексные добавки получили с созданием и внедрением в промышленность суперпластификаторов (IV группа). Многие суперпластификаторы, по существу, представляют собой комплексные добавки на основе высокоэффективных поверхностно-активных веществ. Например, суперпластификатор С-3 наряду с основным действующим компонентом — продуктом конденсации нафталинсульфоокислоты и формальдегида содержит небольшие добавки лигносульфонатов и сульфата натрия. К суперпластификаторам добавляют хлорид, нитрат и глюконат кальция, тиосульфат и бикарбонат натрия, лигносульфонаты, полиоксиэтилен, карбоксиметилцеллюлозу, синтетические микропенообразователи, соли винной кислоты, производные сахаров и другие вещества. Введение в суперпластификаторы дополнительных компонентов позволяет регулировать сроки схватывания и темп твердения бетона; увеличить

сроки сохранения подвижности бетонной смеси; уменьшить водоотделение и расслоение бетонной смеси; регулировать воздухосодержание бетонной смеси, поровую структуру бетона и ее проницаемость и тем самым обеспечивать заданную морозостойкость; повысить плотность, водонепроницаемость и прочность бетона; улучшить качество поверхности бетона; уменьшить расход синтетического продукта и снизить стоимость добавки без ухудшения ее свойств. В зависимости от назначения комплексной добавки подбираются дополнительные компоненты к суперпластификатору.

В нашей стране разработаны и внедряются в технологию бетона высокоэффективные комплексные добавки на основе суперпластификаторов. Комплексные добавки, включающие суперпластификатор и ускоритель твердения (С-3+СН, 10-03+СН, С-3+ННХК, 10-03+ННХК и др.), сокращают на 20 ... 40% время тепловлажностной обработки, особенно при форсированных режимах обработки, а в некоторых случаях позволяют отказаться от нее. Для экономии суперпластификатора и лучшего сохранения подвижности бетонной смеси во времени применяют стабилизаторы, например СДБ. В производстве сборного железобетона эффективны комплексные добавки 10-03+СДБ+ННХК, 10-03+СДБ+СН и др.

Для повышения морозостойкости эффективны комплексные добавки, включающие суперпластификатор и воздухововлекающий компонент (С-3+СНВ, 10-03+СНВ, 10-03+СДБ+СНВ и др.). Для интенсификации твердения в них может вводиться ускоритель твердения, для защиты арматуры от коррозии — ингибитор (С-3+СНВ+ННХК, 10-03+СНВ+ННХК). Применение подобных добавок обеспечивает высокую морозостойкость бетонов, полученных на основе высокоподвижных и литых бетонных смесей.

В состав комплексных добавок, предназначенных для повышения коррозионной стойкости железобетонных конструкций в агрессивной среде, включают суперпластификатор, гидрофобизирующую воздухововлекающую добавку и эффективные ингибиторы: нитрит натрия, тетраборат натрия, бихромат калия (С-3+СНВ+НН, 10-03+СНВ+НН, С-3+ГКЖ-10+БК, 10-03+ГКЖ-10+НН).

Для значительного увеличения времени сохранения подвижности бетонной смеси (до 3 ... 6 ч) к суперпластификаторам добавляют замедлители схватывания (НТФ, КП).

Комплексные добавки на основе суперпластификаторов являются наиболее эффективными и перспективными модификаторами свойств бетонной смеси и бетона и в ближайшие годы применение их в технологии бетона будет развиваться быстрыми темпами.

К комплексным добавкам V группы можно отнести сложные многокомпонентные комплексы, предназначенные для специальных целей. Например, к ним относится добавка, включающая ПАК+СДБ+СН и предназначенная для получения безусадочных и расширяющихся бетонов, и др. К этой группе комплексных добавок можно отнести и битумные эмульсии и эмульсосуспензии. Эти

добавки обладают гидрофобно-пластифицирующим эффектом и применяются для повышения непроницаемости бетона. В состав битумной эмульсии входят битум (как правило, марки БН-III), СДБ, служащая эмульгатором, — 5%, вода — 45%. Эмульсосуспензия содержит 45% битума, 2% СДБ (50%-ного водного раствора), 53% каолиновой суспензии. Битумные дисперсии вводят в бетонную смесь в количестве 5 ... 7% от массы цемента. При использовании битумных эмульсий необходимо учитывать, что выделяющиеся при гидролизе цемента соли кальция могут менять химическую природу некоторых эмульгаторов, что приводит, в свою очередь, к превращению прямой эмульсии (битум в воде) в обратную (вода в битуме). В результате вместо положительного может наблюдаться отрицательное влияние подобных эмульсий на бетонную смесь и бетон. СДБ является эмульгатором, не вызывающим обращения фаз, и может успешно использоваться в этом качестве.

Улучшению свойств битумных эмульсий способствует применение твердых порошкообразных эмульгаторов-стабилизаторов. Добавление высокодисперсных гидрофильных компонентов, например каолина, бентонитовой глины с краевым углом смачивания менее 90°, способствует получению прямой эмульсосуспензии, в которой при смешивании с цементным тестом не происходит обращения фаз.

Комплексные добавки, включающие эмульгатор (СДБ) или выравниватель (вещество, способствующее равномерному распределению одного компонента в другом, например ОП-7), гидрофобизатор (СНВ и др.) и тонкодисперсные гидрофильные порошки (бентонитовая глина) используют для стабилизации свойства литых бетонных смесей. Совместное применение подобных добавок в сочетании с суперпластификатором обеспечивает получение литых нерасслаивающихся бетонных смесей.

Комплексные добавки выпускают в виде готового продукта либо приготавливаются непосредственно на бетоносмесительных узлах из отдельных компонентов, что требует дополнительного оборудования и затрат. Наиболее технологично применение водных растворов и паст-добавок, а для районов Крайнего Севера и Дальнего Востока — порошкообразных добавок.

Тонкомолотые добавки вводят в бетон в количестве 5 ... 20% и более от массы цемента. Эти добавки предназначены для экономии цемента и для получения плотного бетона при малых расходах цемента. К тонкомолотым добавкам относят золы, молотые шлаки, отходы камнедробления, пески и некоторые другие материалы, позволяющие изменять в нужном направлении свойства бетона, повышающие его плотность, водостойкость, жаростойкость, изменяющие электропроводность, окрашивающие и др. При введении тонкомолотых добавок следует учитывать, что на цементных заводах в цемент уже, как правило, введено определенное количество минеральных добавок. Излишнее введение тонкомолотых добавок в бе-

тон без проведения специальных мероприятий по гомогенизации и активации бетонной смеси может снизить долговечность бетона.

При проектировании применения в бетоне добавок необходимо проводить технико-экономические расчеты для прогнозирования ожидаемого эффекта. При этом следует учитывать, что использование добавок в технологии бетона требует дополнительных затрат для создания складов добавок, транспортных магистралей, узлов подготовки добавок, дополнительных дозаторов на бетоносмесительных цехах и заводах. Некоторые добавки имеют сравнительно высокую стоимость и еще дефицитны. Поэтому необходимо использовать добавки в первую очередь там, где их применение дает наибольший технико-экономический эффект.

§ 2.4. ВОДА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Для приготовления бетонной смеси используют водопроводную питьевую, а также любую воду, имеющую водородный показатель pH не менее 4, т. е. некислую, не окрашивающую лакмусовую бумагу в красный цвет. Вода не должна содержать сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO_4^{--}) и всех солей более 5000 мг/л. В сомнительных случаях пригодность воды для приготовления бетонной смеси необходимо проверять путем сравнительных испытаний образцов, изготовленных на данной воде и на обычной водопроводной.

Для приготовления бетонной смеси можно применять морскую и другие соленые воды, удовлетворяющие приведенным выше условиям. Исключением является бетонирование внутренних конструкций жилых и общественных зданий и надводных железобетонных сооружений в жарком и сухом климате, так как морские соли могут выступить на поверхности бетона, а также вызвать коррозию стальной арматуры.

Для поливки бетона следует применять воду такого же качества, как и для приготовления бетонной смеси.

ГЛАВА 3

БЕТОННАЯ СМЕСЬ

§ 3.1. СТРУКТУРА БЕТОННОЙ СМЕСИ

В процессе изготовления и твердения бетона можно выделить два периода, когда материал характеризуется различными свойствами и состоянием: 1) до схватывания цемента и превращения бетона в твердое тело — бетонная смесь и 2) период твердения и эксплуатации материала, обладающего всеми свойствами твердого тела, — бетон.

● Бетонную смесь, представляющую собой сложную многокомпонентную полидисперсную систему, получают при затворении водой смеси цемента с заполнителем. В нее также в ряде случаев могут входить специальные добавки и вовлеченный в процессе приготовления смеси воздух.

Бетонную смесь получают и при затворении смеси заполнителей органическими и другими жидкими связующими. В настоящем разделе рассматриваются обычные цементные бетоны.

Вследствие наличия внутренних сил взаимодействия между частицами твердой фазы и воды бетонная смесь приобретает связанность и определенные свойства, характерные для структурированных вязких жидкостей. По своим свойствам бетонные смеси занимают промежуточное положение между вязкими жидкостями и твердыми телами. От истинно вязких жидкостей они отличаются наличием некоторой прочности структуры или структурной вязкостью, возникающей благодаря силам вязкого трения; от твердых тел — отсутствием достаточной упругости формы и способностью к значительным необратимым пластическим деформациям течения даже при незначительных нагрузках.

Свойства бетонных смесей зависят от их структуры и свойств составляющих и обладают рядом особенностей, из которых существенное значение имеют: способность смеси как бы псевдоразжижаться или становиться более подвижной под влиянием механических воздействий; постоянное изменение свойств (потеря подвижности) под влиянием физико-химических процессов взаимодействия цемента и воды вплоть до схватывания системы и превращения в твердое тело.

Свойства бетонных смесей и их поведение в процессе приготовления, укладки и уплотнения определяются характером и значением сил, действующих между частицами твердой фазы и жидкостью (вода с растворенными в ней веществами, появляющимися в процессе гидратации или введенными в смесь).

Взаимодействие между твердыми частицами в бетонной смеси определяется наличием жидкой среды: только при добавлении к сухой смеси цемента и заполнителя воды эта смесь приобретает структуру и свойства, присущие бетонной смеси. Силы взаимодействия между твердыми частицами бетонной смеси имеют разную физическую природу и зависят как от размеров частиц (табл. 3.1), так и от объема жидкой фазы, ее природы, наличия в ней ионов других веществ, величины поверхностного натяжения.

Зерна песка и щебня и пустоты между ними достаточно велики, удельная поверхность мала, и поэтому действие поверхностных сил практически ничтожно. Смесь не имеет связанности, вода под действием гравитационных сил вытекает из пустот между зернами заполнителя. При приложении внешних сил в такой смеси появляются механические силы внутреннего трения.

С уменьшением размера частиц (до $1 \dots 0,1$ мм) возникают ка-

Таблица 3.1. Силы, действующие между твердыми частицами в бетонной смеси

Размер частиц, мм	Тип силы и характер взаимодействия	Эффект взаимодействия	
		притяжение	отталкивание
40...1	Механические	—	—
1...0,1	Капиллярные	+	—
0,1... $2 \cdot 10^{-4}$	Флокуляции	++	—
$2 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-6}$	Коллоидные	—	+

пиллярные силы. Смесь приобретает связанность. Капиллярные силы действуют при отсутствии лишнего количества воды, в местах контакта твердых частиц, в то время как поры между частицами заполнены воздухом. Действие сил поверхностного натяжения в образующихся водных менисках обеспечивает сцепление между частицами. Смесь имеет, как правило, жесткую консистенцию.

С уменьшением размера частиц ($0,1 \dots 2 \cdot 10^{-4}$ мм) начинают проявляться силы поверхностного взаимодействия — флокуляционные. На поверхности кристаллических материалов, к которым относятся материалы твердой фазы бетонной смеси (цемент, тонкодисперсные добавки и др.), обычно возникают электрические заряды. В мельчайших частицах эти заряды (обычно на острых углах и ребрах) играют доминирующую роль, способствуя образованию флокул вследствие притяжения положительных и отрицательных зарядов (рис. 3.1). Вода в флокулах делается неподвижной, объем пор в флокулах значителен. Гравитационные силы из-за малых размеров частиц проявляются незначительно. Смесь обладает высокой связанностью, но требует повышенного расхода воды. Подвижность смеси невелика.

Частицы коллоидных размеров ($2 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-6}$ мм) взаимодействуют между собой через возникающую на их поверхности сольватную оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы.

По современным представлениям, вступающие во взаимодействие с водой поверхности твердых тел, обладающие некомпенсированными молекулярными силами, способны притягивать молекулы воды, которые, обладая значительным дипольным моментом, в зоне действия силовых полей твердого тела ориентируются и уплотняются. Создается изменение концентрации вблизи поверхности твердого тела — адсорбция. Электрическая ориентировка и громадные давления, возникающие в зоне действия молекулярных сил, приводят к тому, что вода в адсорбированных пленках становится

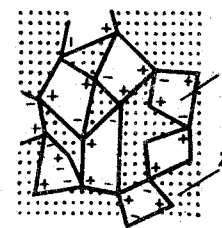


Рис. 3.1. Схема образования флокул:
1 — частицы цемента;
2 — вода

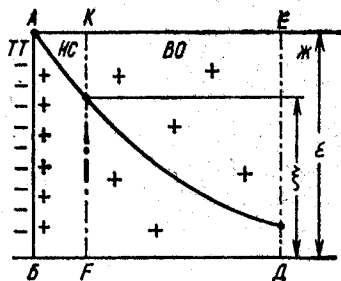


Рис. 3.2. Схема образования двойного электрического слоя:

AB — поверхность твердого тела; KF — граница неподвижного слоя молекул жидкости (НС); DE — внешняя граница слоя ориентированных молекул жидкости (ВО); Ж — жидкая фаза; ξ — электрокинетический потенциал; ϵ — полный термодинамический потенциал

в диффузионном слое резко падают при переходе от мономолекулярного к полимолекулярным слоям воды. Если в первом слое вода приближается по свойствам к твердому телу и ее плотность повышается, то в последующих слоях действие поля твердой фазы проявляется незначительно и вода по структуре и плотности остается близкой к обычной воде, хотя подвижность ее несколько ограничена, вплоть до слоя, когда действие молекулярных сил перестает сказываться.

На границе раздела возникает ϵ -потенциал (рис. 3.2), который носит название термодинамического или полного. В границах более подвижной части двойного диффузного слоя (внешней оболочки) возникает электрокинетический ξ -потенциал, оказывающий большое влияние на устойчивость коллоидных систем. Значение ξ -потенциала зависит от природы твердого материала и свойств жидкости.

Зерна цемента в воде адсорбируют ионы Ca^{++} , и их поверхность приобретает положительный ξ -потенциал. Если количество воды достаточное, частицы отталкиваются друг от друга (рис. 3.3). Влияние отталкивающих сил тем больше, чем меньше частицы или выше плотность заряда. Под их влиянием смесь приобретает большую подвижность, однако высокая удельная поверхность твердых частиц требует большого расхода воды. При меньшем количестве воды частицы через сольватные оболочки или непосредственно в местах контакта соприкасаются и притягиваются друг к другу (рис. 3.4). Возможно образование флоккул с неподвижно заземленной водой. Масса вместо жидкой становится

неподвижной и приобретает некоторые свойства твердого тела — упругость, прочность на сжатие, пониженную точку замерзания. По данным Б. В. Дерягина, вода при толщине слоя в $0,09 \text{ мкм}$ обладает модулем сдвига в $1,9 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$.

С удалением от твердой поверхности воздействие молекулярных сил уменьшается, но вследствие полярности молекул воды образуются ориентированные цепочки в несколько десятков или сотен молекул, уходящие в глубь жидкой фазы. Длина таких цепочек зависит от свойств поверхности твердого тела и процессов, протекающих при гидратации. Толщина слоя такой ориентированной воды, во многих отношениях потерявшей свойства обычной жидкости, может составлять сотые или даже десятые доли микрометра (обычно менее $0,15 \text{ мкм}$). Силы связывания и изменение свойств воды в диффу-

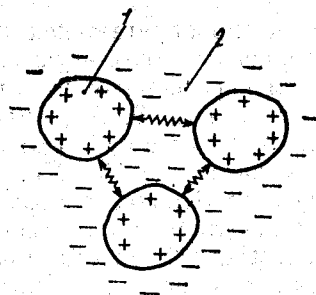


Рис. 3.3. Схема отталкивания частиц цемента под действием ξ -потенциала:

1 — частицы цемента; 2 — вода

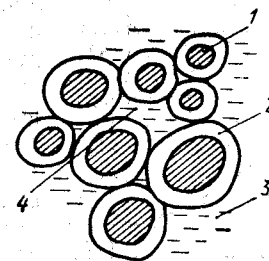


Рис. 3.4. Схема образования коагуляционной структуры из частиц коллоидных размеров с сольватными оболочками:

1 — частица цемента; 2 — сольватная оболочка; 3 — свободная вода; 4 — «неподвижная» вода

ся гелеобразной. Если частицы в смеси имеют противоположные заряды, происходит коагуляция (или флокуляция), которая ведет к снижению подвижности. Флокуляция может быть уменьшена при увеличении толщины сольватной оболочки или частичной нейтрализации поверхностного заряда (например, за счет увеличения содержания жидкости или применения специальных добавок).

Образующиеся на поверхности коллоидных частиц полутвердые водные оболочки выполняют двойную функцию. С одной стороны, оболочки придают цементной суспензии связанность и известную устойчивость, т. е. способность в определенной мере сопротивляться деформациям, возникающим под действием внешних сил, не нарушая своей сплошности и не утрачивая формы. С другой стороны, эти оболочки обладают как бы смазочными свойствами, облегчая скольжение твердых частиц одна по другой за счет действия отталкивающих сил и образования ориентированными молекулами воды плоскостей скольжения по местам более слабых водородных связей.

Бетонная смесь содержит частицы различных размеров, и поэтому в ней проявляются все отмеченные выше силы. Однако на их эффективность влияют характер структуры бетонной смеси и взаимодействие между частицами разного размера. Мельчайшие частицы, осаждаясь и прилипая к поверхности более крупных зерен, теряют подвижность, и для ее увеличения необходимо введение дополнительного количества воды и мельчайших частиц. Увеличение количества воды способствует повышению подвижности, но уменьшает сцепление бетонной смеси.

Влияние различных сил на связанность, подвижность и водопотребность бетонной смеси показано на рис. 3.5. Меняя струк-

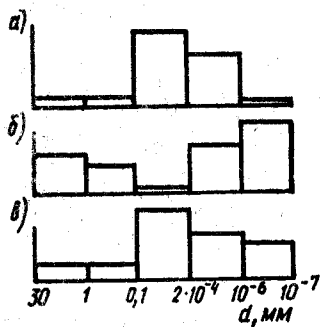


Рис. 3.5. Влияние на связность (а), подвижность (б) и водопотребность (в) бетонной смеси твердых частиц разных размеров за счет действия различных сил на их поверхности

туру бетонной смеси, соотношение между частицами разного размера и содержание жидкой фазы, получают заданную подвижность и связанность бетонной смеси.

Для увеличения подвижности бетонной смеси необходимо уменьшение флокулообразующих сил и увеличение сил отталкивания (эффект двойного слоя). Это достигается повышением В/Ц и тем самым увеличением расстояния между зернами цемента; использованием высокоскоростного перемешивания для диспергации флюкул цемента, вибрирования (временное разрушение флюкул под действием внешних сил); введением больших молекул, адсорбирующихся частицами цемента и препятствующих образо-

ванию флюкул (химические добавки); введением веществ, повышающих значение ξ -потенциала и увеличивающих эффект двойного слоя (отталкивания); введением очень малых (менее 10 мкм) частиц с положительным ξ -потенциалом (зола-унос и др.); введением воздушных пузырьков (за счет воздухововлекающих добавок), играющих роль подшипников скольжения; уменьшением поверхностного натяжения воды в смеси путем введения специальных добавок.

Эффективными модификаторами структуры и свойств бетонной смеси являются химические добавки, в первую очередь пластификаторы и суперпластификаторы. Воздействуя на поверхностные явления и микроструктуру цементного теста, добавки позволяют управлять свойствами бетонной смеси и способствуют получению ее оптимальной структуры и свойств.

Поверхностно-активные вещества, являющиеся наиболее распространенными пластификаторами, обычно имеют сложное строение и, как правило, включают гидрофильные группы и гидрофобные углеводородные радикалы (цепи). Характер действия ПАВ на цементное тесто и бетонную смесь определяется строением молекулы ПАВ и соотношением гидрофильных и гидрофобных частей молекулы ПАВ. Качественная оценка их действия может быть сделана на основе так называемого гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ), который характеризуется числами от 1 до 40, определяемыми по виду дисперсии вещества в воде. Если вещество не диспергируется и имеет явно выраженные гидрофобные свойства, то ГЛБ-1...4; если хорошо диспергируется, то ГЛБ-9...12; если получается прозрачный раствор, то ГЛБ > 13.

Особенностью ПАВ является способность адсорбироваться на

поверхности твердой фазы и участвовать в образовании пространственных коагуляционных структур. Гидрофобизирующие ПАВ с малыми значениями ГЛБ, адсорбируясь на поверхности цемента, ориентируются таким образом, что гидрофильные полярные группы, включающие анионы, хемосорбционно связываются с гидратирующейся поверхностью зерен цемента, а гидрофобные

углеводородные радикалы обращены к воде (рис. 3.6). Тем самым гидрофобизирующие ПАВ как бы создают на поверхности твердых частиц «частокол» ориентированных молекул. Установлено, что высшие жирные кислоты и некоторые другие ПАВ, не являясь кристаллами, тем не менее отражают в тонком слое рентгеновские лучи подобно правильно образованным кристаллам. Это обусловлено тем, что молекулы гидрофобизирующих ПАВ в тонкой пленке на поверхности твердых частиц ориентируются нормально или наклонно к подкладке, оставаясь параллельными между собой. Ориентация не ограничивается одним слоем, каждый последующий располагается под влиянием предыдущего, но по мере удаления от твердой подкладки взаимодействие молекул ослабевает. Получается как бы пачка слоев-листочков, образованных молекулами, повернутыми друг к другу своими полярными группами. Слоистое строение оболочки создает плоскости скольжения по местам более слабых связей и тем самым облегчает взаимное перемещение твердых частиц, пластифицируя бетонную смесь. При внешнем силовом воздействии ориентация молекул усиливается и соответственно возрастает пластифицирующий эффект.

Между полярно-активными группами гидрофобизирующих ПАВ действуют сильные поля; углеводородные цепи молекул, наоборот, обладают слабым молекулярным полем. Коагуляционные связи, возникающие в водной среде между метильными группами, являются более слабыми, чем между полярными концами молекул, и при приложении усилий, касательных к плоскостям, образованным метильными группами, они становятся плоскостями скольжения. В бетонной смеси более сильное по отношению к воде силовое поле клинкерных минералов и частиц заполнителей оказывается замененным более слабым полем метильных групп

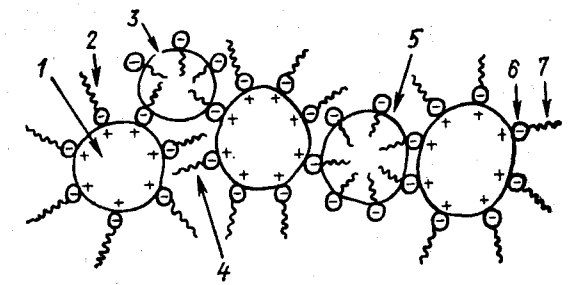


Рис. 3.6. Действие гидрофобизирующей воздухововлекающей добавки:

1 — частица цемента; 2 — молекула добавки; 3 — пузырек вовлеченного воздуха; 4 — зона уменьшения действия двойного слоя неполярными цепями молекул добавки; 5 — зона увеличения флокуляции за счет склеивания воздушного пузырька и твердой частицы; 6 — анионная группа; 7 — неполярный радикал

оболочек гидрофобизирующих ПАВ. При воздействии на бетонную смесь внешних сил наличие оболочек ПАВ способствует взаимному перемещению твердых частиц. Наоборот, в покое проявляется положительное влияние коагуляционного эффекта, вызываемого углеводородными цепями, препятствуя седиментации и расслоению бетонной смеси.

Так как степень ориентации молекул и, следовательно, пластифицирующий эффект зависят от внешнего механического воздействия, то повышению эффективности ПАВ в бетонной смеси способствуют ее более интенсивное перемешивание и предварительная механическая активация цемента.

Гидрофобизирующие добавки стимулируют образование флоккул и воздухововлечение в бетонную смесь (рис. 3.6). Отрицательно заряженные пузырьки воздуха прилипают к частицам цемента, что обеспечивает хорошие условия для их стабилизации, и при воздействии внешних сил выполняют роль шариков, облегчающих течение смеси. В результате возрастают подвижность смеси и ее связанность. Можно ожидать, что усилению пластификации смеси будет способствовать применение ПАВ с большей молекулярной массой радикалов и повышенной степенью гидрофильности функциональных групп. Передозировка гидрофобизирующей добавки приводит к торможению гидратации цемента, так как образующиеся адсорбционные экранирующие слои препятствуют взаимодействию воды и цемента.

Увеличение ГЛБ ведет к изменению свойств и основного эффекта действия ПАВ. При ГЛБ=9...12 в структуре добавки возрастает количество активных функциональных групп и добавки относятся уже к гидрофилизирующим ПАВ. Изменяется механизм ее воздействия на бетонную смесь. Адсорбция добавки на поверхности твердых частиц приводит к изменению электрокинетического ξ -потенциала, что способствует дефлокуляции (пептизации) цементных частиц и их стабилизации в цементном тесте за счет действия сил отталкивания. Механизм действия таких добавок объясняет рис. 3.7.

Гидрофилизирующие ПАВ, диспергируя цементные и другие тонкомолотые частицы, увеличивают содержание в смеси мельчайших частиц с сольватными оболочками и тем самым количество прочно связанной воды. В результате возрастает эффект «смазки» и увеличивается подвижность бетонной смеси. При применении гидрофилизирующих

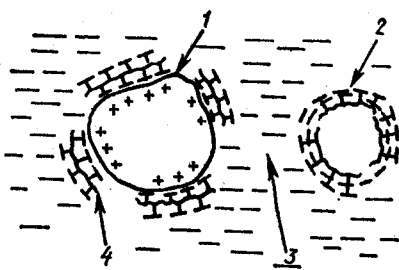


Рис. 3.7. Действие гидрофилизирующей добавки (разжижителя): 1 — частица цемента; 2 — воздушный пузырек; 3 — вода; 4 — молекула добавки с отрицательным зарядом на поверхности (анионная с полярной цепью)

ПАВ возможно вовлечение в бетонную смесь пузырьков воздуха, но эти пузырьки изолированы и легче удаляются из смеси.

В технологии бетона наиболее перспективно применение анионно-активных ПАВ (см. рис. 3.6 и 3.7), на долю которых приходится около 75% пластифицирующих добавок. Однако известны и добавки ПАВ с другим строением молекул (катионактивные и неионогенные). Механизм их воздействия также основывается на активном влиянии на поверхностные явления в системе твердое тело—жидкость, в результате чего облегчается течение смеси и улучшается ее подвижность.

Оказывают некоторое влияние на подвижность и другие типы добавок, например электролиты, тонкомолотые минеральные порошки. Однако пластифицирующий эффект их обычно невелик.

Особое место в модификации бетонной смеси в последние годы заняли суперпластификаторы, представляющие собой анионно-активные органические вещества коллоидного размера (молекулярная масса $\sim 20\,000$) с большим количеством полярных групп в цепи. При введении суперпластификаторов в бетонную смесь они, адсорбируясь на твердой поверхности зерен цемента и заполнителя, создают на поверхности утолщенную оболочку со значительным отрицательным ξ -потенциалом (рис. 3.8) и тем самым повышают эффект диспергации и отталкивания частиц и подвижность бетонной смеси. Однако для обеспечения их хорошего взаимодействия с поверхностью твердых частиц требуется интенсивное перемешивание или предварительная активация в присутствии добавки.

Суперпластификаторы не оказывают заметляющего влияния на гидратацию цемента. Это можно объяснить их воздействием на поверхностную оболочку цементных зерен и возникающие новообразования. Молекулы суперпластификатора как бы вызывают дефлокуляцию пленки, адсорбируя игольчатые кристаллы этtringита и тем самым высвобождая часть иммобилизованной этtringитом воды и улучшая доступ воды к внутренним слоям цементного зерна.

Вместе с тем подобный механизм приводит к ограничению времени действия добавки, так как все большее ее количество связывается на поверхности цемента и как бы остается «встроенной» в структуру утолщающейся во времени поверхностной оболочки из новообразований цемента. Поэтому дозировка добавки зави-

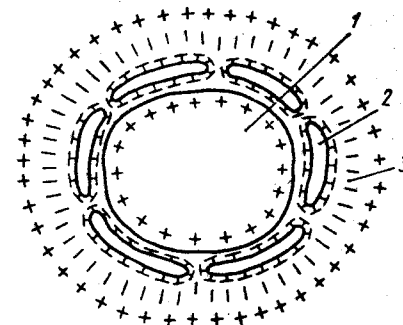


Рис. 3.8. Действие суперпластификатора:

1 — частица цемента; 2 — органическая молекула коллоидного размера с отрицательными зарядами на поверхности (анионные группы); 3 — водная оболочка

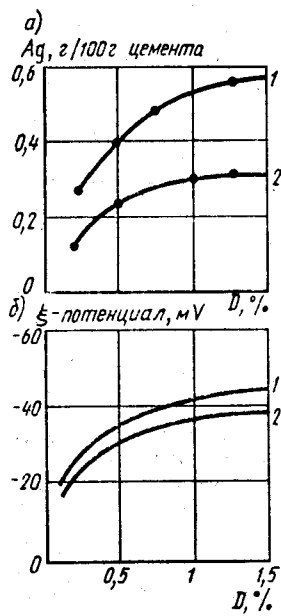


Рис. 3.9. Влияние дозировки и вида суперпластификатора на величину его адсорбции (а) и значение ξ -потенциала (б): 1 — добавка МСФ; 2 — добавка НСФ

Возникновение высоких значений ξ -потенциала создает электростатические силы отталкивания между цементными частицами и способствует их пептизации. Это подтверждают кривые на рис. 3.10, показывающие распределение частичек разного размера в цементной суспензии при дозировке добавки 1%.

Введение добавки препятствует флокуляции цементных частичек при смешивании их с водой и в процессе гидратации. Определенное влияние оказывают добавки и на начальный период гидратации цемента (рис. 3.11). Введение суперпластификатора несколько замедляет гидратацию в первые минуты, однако к моменту наступления значительного замедления гидратации, так называемого инкубационного периода (см. гл. 4), степень гидратации цементного теста с добавкой несколько больше. Это способствует увеличению в нем мельчайших частиц новообразова-

сит от времени введения: чем меньше срок от приготовления до укладки бетонной смеси, тем меньше оптимальная дозировка добавки.

Рассмотренный механизм действия суперпластификаторов на бетонную смесь подтверждается опытными данными*. Для проведения опытов были использованы наиболее распространенные суперпластификаторы, натриевые соли поликонденсата формальдегида и нафталинсульфонафта (НСФ) и поликонденсата формальдегида и меламиносулфонафта (МСФ). На рис. 3.9,а показана зависимость количества адсорбируемой добавки от ее дозировки в цементном тесте с В/Ц=0,3. С увеличением дозировки до 1...1,25% адсорбция повышается, при больших дозировках увеличение адсорбции незначительно. Более высокой адсорбирующей способностью обладает добавка МСФ. Аналогичным образом действует суперпластификатор на значение ξ -потенциала (рис. 3.9,б). Поверхностный заряд отрицателен вследствие анионного характера использованных добавок. Большой ξ -потенциал возникает при введении в цементную суспензию добавки МСФ.

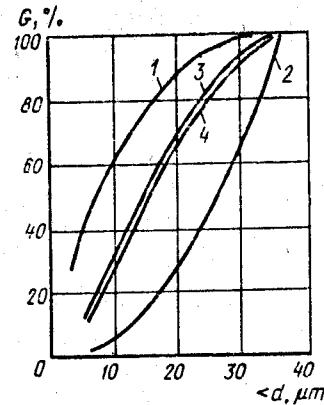


Рис. 3.10. Влияние суперпластификатора на распределение цементных частиц по размерам:

1 — распределение для сухого цемента; 2 — распределение в воде без добавки; 3 — с добавкой МСФ; 4 — с добавкой НСФ

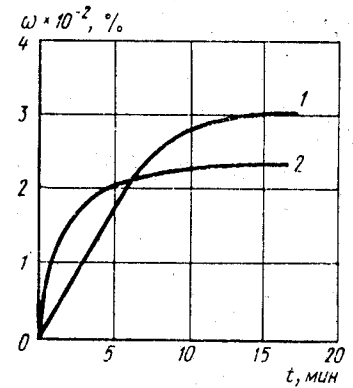


Рис. 3.11. Кинетика гидратации цементного теста:

1 — с добавками МСФ и НСФ; 2 — без добавки

ний, взаимодействующих с добавкой и возникающих в период до укладки материала в дело.

Все перечисленные факторы: возникновение отрицательного ξ -потенциала, диспергирование цементных частичек и новообразований — приводят к заметному повышению подвижности цементного теста (рис. 3.12). Зависимость подвижности от вида и дозировки добавки полностью соответствует отмеченному выше влиянию добавки на строение цементного теста: подвижность более заметно увеличивается при изменении дозировки добавки до 1...1,25%, более эффективной является добавка МСФ.

При приготовлении, укладке и уплотнении бетонная смесь подвергается различным внешним силовым воздействиям, которые вызывают определенные изменения в ее структуре. При приложении к бетонной смеси внешних сил в ней происходят взаимное перемещение отдельных объемов и частиц, разрушение флокул — понижается связанность системы, возрастает ее подвижность. При прекращении действия сил связанность восстанавливается. Это явление получило название *тиксотропии*.

Перемещения в бетонной смеси на микро- и макроуровне происходят по определенным плоскостям скольжения. Эти плоскости возникают под влиянием сдвигающих напряжений (рис. 3.13). Частицы перемещаются, расстояние между их центрами увеличивается, сцепление уменьшается. В плоскости скольжения увеличиваются пористость и объем жидкой фазы. При затвердевании здесь образуется менее плотная и более слабая структура. Если поверхность заполнителя очень гладкая (морская галька), то

* Работа выполнена Ю. М. Баженовым, М. М. Изжановым, Дж. Кнокью, А. Е. Паолини. Опыты проведены по специальной методике в 1983 г. в Институте прикладной химии Римского университета.

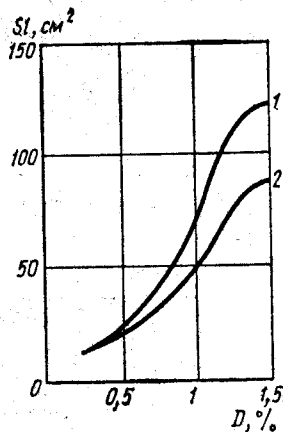


Рис. 3.12. Влияние дозировки и вида суперпластификатора на подвижность цементного теста: 1 — с добавкой МСФ; 2 — с добавкой НСФ

плоскость скольжения образуется непосредственно по поверхности, так как сопротивление сдвигу в этом случае будет минимальным. Обычные заполнители имеют шероховатую поверхность и заметную величину поверхностного некомпенсированного заряда, притягивающего цементные частицы. В этом случае плоскость скольжения несколько отстоит от поверхности заполнителя и именно в этой зоне может образовываться при затвердевании ослабленная структура бетона (рис. 3.14).

Для образования плоскостей скольжения и разрушения флокул необходимо приложить определенную внешнюю силу сдвига. После понижения связанности системы значение силы сдвига, вызывающее перемещение в бетонной смеси, уменьшается. Это объясняет особенности реологических свойств бетонной смеси.

Для практических целей структуру бетонной смеси удобно рассматривать как систему, состоящую из двух компонентов: *цементного теста и заполнителя*. Основным структурообразующим компонентом бетонной смеси является цементное тесто, в состав которого входят цемент, вода, в ряде случаев тонкомолотые минеральные добавки или золы. Частицы цемента и тонкомолотых добавок отличаются малыми размерами и большой удельной поверхностью, в результате чего цементное тесто обладает высоко-развитой поверхностью раздела твердое тело — жидкость и в нем сильнее проявляются силы адсорбционного, молекулярного и капиллярного взаимодействия, придающие системе связанность и подвижность.

Структура цементного теста с момента затворения водой находится в постоянном изменении. Эти изменения вызываются как внешними силами, действующими при перемешивании и уплотнении бетонной смеси, так и внутренними физико-химическими процессами, в первую очередь гидратации цемента. Внешние силы, как правило, способствуют диспергации цементных зерен, разрушению флокул, лучшему распределению воды на поверхности цемента и тем самым повышают подвижность бетонной смеси. При гидратации цемента образуются новообразования с высокой удельной поверхностью. На поверхности цементных зерен появляется переходный слой, активно взаимодействующий с водой, удельная поверхность твердой фазы увеличивается (см. гл. 4). В результате возрастает количество связанной воды, а подвижность бетонной смеси уменьшается.

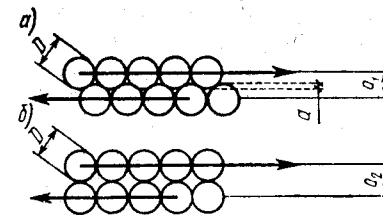


Рис. 3.13. Схема перемещения цементных частиц и образования плоскостей скольжения в цементном тесте: а — положение частиц до перемещения; б — при перемещении ($a \approx 0,3 D$)

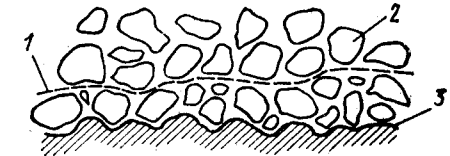


Рис. 3.14. Схема образования плоскостей скольжения в контактной зоне бетонной смеси вблизи поверхности заполнителя: 1 — плоскость скольжения; 2 — зерна цемента; 3 — поверхность заполнителя

Вода в бетонной смеси находится в различных состояниях (табл. 3.2). Небольшая часть воды вступает в химическое взаимодействие с цементом и находится в *химически связанном* состоянии. Относительное количество этой воды постепенно увеличивается, однако к моменту схватывания не превышает 5%. Другая часть воды под действием адсорбционных сил оказывается *физико-химически связанной* на поверхности твердой фазы.

Количество ее также меняется в процессе гидратации цемента, которая обычно сопровождается увеличением удельной поверхности твердой фазы. В свежеприготовленном цементном тесте относительное содержание этой воды составляет около 3...5%, увеличиваясь к моменту схватывания до 25% от общего содержания воды.

Основное количество воды в цементном тесте находится в межзерновом пространстве, размеры отдельных пор и полостей которого могут изменяться от 1 до 50 мкм и больше, что в десятки и сотни раз больше, чем толщина даже слабо связанных сольват-

Таблица 3.2. Вода в бетонной смеси

Характер связи	Условия и причины образования связи	Ориентировочное относительное содержание воды, % от общего количества воды	
		в свежеприготовленной смеси	В период схватывания цемента
Химическая (в точных количественных соотношениях)	Гидратация и кристаллизация из раствора	1...2	4...5
Физико-химическая, адсорбционная	Адсорбция в зоне действия молекулярных силовых полей твердой фазы	3...5	20...25
Механическая, структурная	Захват воды в тонкие капилляры, поры, флокулы	93...95	70...75

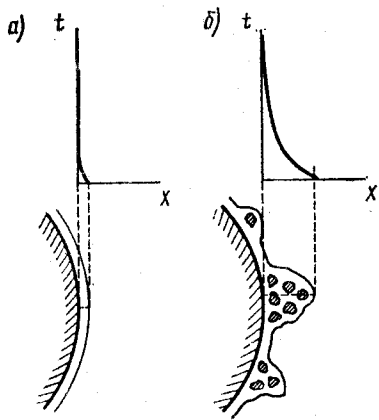


Рис. 3.15. Влияние заполнителя на воду (а) и цементное тесто (б)

до 65...70% к моменту схватывания. Свободная вода оказывает заметное влияние на подвижность цементного теста.

Введение заполнителя в цементное тесто существенно влияет на свойства материала. Поверхность заполнителя оказывает воздействие на прилегающие слои цементного теста. За счет адсорбционных, молекулярных и капиллярных сил эти слои теряют подвижность, подобно тому явлению, которое имеет место при адсорбции воды поверхностью твердого тела. Однако при этом взаимодействие охватывает мельчайшие частицы цемента и зона воздействия заполнителя на цементное тесто увеличивается (рис. 3.15). Толщина зоны воздействия зависит от свойств заполнителя и цемента и в среднем составляет около 10...15 мкм. Влияние заполнителя возрастает с увеличением его содержания или удельной поверхности.

В зависимости от соотношения между цементным тестом и заполнителем можно выделить три основные структуры бетонной смеси (рис. 3.16).

■ В первой структуре зерна заполнителя раздвинуты на значительное расстояние и практически между собой не взаимодействуют; они оказывают влияние лишь на прилегающую зону цементного теста, а суммарное действие их прямо пропорционально содержанию зерна заполнителя и их удельной поверхности.

■ Во второй структуре цементного теста меньше и оно лишь заполняет поры между зернами заполнителя с незначительной раздвижкой самих зерен слоем обмазки, толщина которого в местах контакта зерен заполнителя равна 1...3 средним диаметрам частиц цемента. В этих условиях зоны воздействия отдельных зерен заполнителя начинают перекрывать друг друга — возникает трение между зернами заполнителя. Для придания смеси той же

ных пленок воды. Вследствие действия капиллярных сил и образования флоккул и геля в процессе гидратации цемента вода в межзерновом пространстве механически связана со структурой цементного камня. По образному выражению Н. А. Мощанского, это вода, «запутанная в структуре». Часто ее также называют свободной, подразумевая, что она не связана химически и не испытывает воздействия молекулярных сил твердой фазы. Относительное количество свободной воды от общего объема воды составляет около 95% сразу после приготовления цементного теста и уменьшается

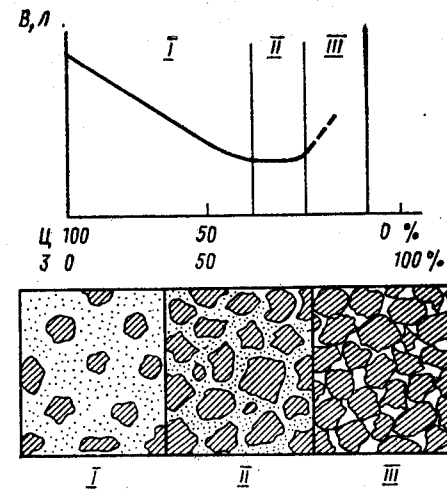


Рис. 3.16. Типы структур бетонной смеси и влияние их на водопотребность равноподвижной смеси:

I — смесь с плавающим заполнителем; II — смесь с плотной упаковкой заполнителей; III — крупнопористая смесь с недостатком цементного теста

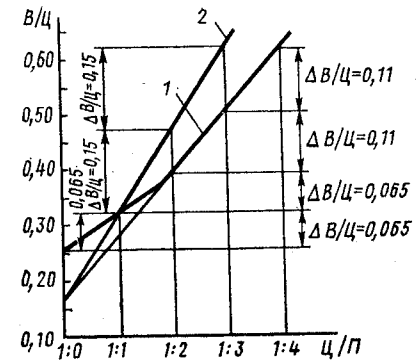


Рис. 3.17. Изменения В/Ц, необходимые для получения равноподвижных цементно-песчаных смесей при различном соотношении цемента и песка:

1 — песчаный бетон на песке средней крупности; 2 — песчаный бетон на мелком песке

подвижности, что и в структуре первого типа, требуются более интенсивные воздействия или увеличение подвижности цементного теста за счет изменения В/Ц в большей мере, чем это было свойственно структурам первого типа.

На рис. 3.17 приведены результаты одного из опытов, показывающие, насколько требуется увеличить В/Ц для получения растворов одинаковой подвижности (на встряхивающем столике) при повышении содержания песка. Четко виден перелом кривых, указывающих на переход от одного типа структуры к другому, причем при применении мелкого песка граница перехода сдвинута в зону составов с большим расходом цемента, что необходимо для заполнения увеличенного объема пустот и обмазки большей суммарной поверхности зерен мелкого песка.

На основе этих данных можно ориентировочно определить условную толщину зоны влияния заполнителя. Используемые в опыте пески имели следующие характеристики: песок № 1 средней крупности — $M_{к1}=2,43$, $\rho'_{1}=1,54$ г/см³, $\rho_{1}=2,63$ г/см³, $V_{п1}=41,4\%$, $s_{1}=144$ см²/г; песок № 2 очень мелкий — $M_{к2}=1,03$, $\rho'_{2}=1,37$ г/см³, $\rho_{2}=2,63$ г/см³, $V_{п2}=47,8\%$, $s_{2}=342$ см²/г (в песке содержалось 20% мельчайших частиц менее 0,16 мм). Условная граница перехода структуры от первого вида ко второму для

раствора на песке № 1 лежит в районе состава 1 : 2 при $V/C = 0,38$, для раствора на песке № 2 — в районе состава 1 : 1 при $V/C = 0,315$. Условная толщина (мкм) обмазки заполнителя

$$\delta = (CT - V_n) / s_{cm},$$

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_n} + V/C}; \quad V = C \cdot V/C; \quad П = nC;$$

$$V_n = \frac{П}{\rho_n'} П_{от}; \quad s_{cm} = s_{уд} П,$$

где s_{cm} — поверхность песка в единице раствора, $см^2/г$.

Для песка № 1 $\delta = 11$ мкм, для песка № 2 $\delta = 8,5$ мкм.

■ В третьей структуре бетонной смеси цементного теста мало, оно только обмазывает зерна заполнителя слоем небольшой толщины, а поры между зернами заполняет лишь частично.

Каждая структура имеет свои закономерности, определяющие ее свойства и влияние на них различных факторов. Для структуры первого типа решающее значение имеют свойства цемента; реологические свойства определяются в соответствии с зависимостями, характерными для вязких жидкостей. В структуре второго типа возрастает роль заполнителя и трения между его зернами. Особенно сильно влияет заполнитель на свойства структур третьего типа, и реологические свойства в этом случае должны описываться с учетом сил внутреннего (сухого) трения.

Переход от одного типа структуры к другому с увеличением содержания заполнителя совершается постепенно. Вначале переход намечается в отдельных малых объемах и постепенно охватывает весь объем бетонной смеси. При переходе от второго типа структуры к третьему сначала (при небольшой нехватке цементного теста для заполнения пустот в заполнителе) при перемешивании и укладке в бетонную смесь вовлекается большое количество мельчайших пузырьков воздуха, которые как бы увеличивают объем цементного теста и тем самым способствуют заполнению межзернового объема пустот в заполнителе. Такую структуру правильнее относить ко второму типу. При дальнейшем уменьшении содержания цементного теста увеличиваются объем вовлекаемого воздуха и размеры пузырьков воздуха, возникают сплошные большие разрывы и неплотности. Такая структура уже должна относиться к третьему типу.

Вследствие постепенного характера изменения структур бетонной смеси границы между структурами условно могут сдвигаться при изменении свойства цемента и заполнителя, подвижности бетонной смеси, методов формования и других факторов. Обычные бетонные смеси относятся ко второму типу структур. Подобные структуры отличаются высокой эффективностью и позволяют полу-

чать нерасслаиваемые бетонные смеси заданной подвижности при минимальном расходе цемента. Примером смеси, имеющей структуру первого типа, является цементно-песчаная смесь с повышенными расходами вяжущего, применяемая для изготовления аромцементных конструкций. Структуру третьего типа имеют беспесчаные бетонные смеси (для крупнопористого бетона) и некоторые тощие составы строительных растворов.

Структура бетонной смеси, образовавшаяся в процессе ее приготовления и укладки, в последующем до момента затвердевания может претерпевать изменения, вызываемые гидратацией цемента (см. выше) и осаждением твердых частиц под действием сил тяжести. Перераспределение твердых частиц по объему бетонной смеси называется расслоением или седиментацией. При этом можно различить два процесса: в первом происходит осаждение крупных тяжелых зерен, в результате чего несколько уплотняется смесь в нижней частях формы или конструкции, а лишняя вода отжимается наверх или скапливается под крупными зернами заполнителя; во втором подобное явление происходит с цементными зернами (вследствие их малой величины) с меньшей скоростью, причем оно обычно развивается в порах между заполнителями.

При применении легких заполнителей может наблюдаться обратная картина: зерна заполнителя всплывают, а раствор скапливается в нижних частях формы или изделия. При этом чем заметнее разница в плотности отдельных видов твердых зерен и жидкости, тем больше вероятность расслоения бетонной смеси.

Расслоение может возникать и в процессе укладки и уплотнения бетонной смеси. Длительное вибрирование, вызывая разжижение смеси, в некоторых случаях (в подвижных смесях) будет способствовать ее расслоению.

Склонность к расслоению зависит и от структуры бетонной смеси: большую склонность проявляют смеси первого типа структуры, меньшую — смеси, имеющие оптимальную структуру второго типа. Склонность к расслоению увеличивается с повышением расхода воды и водоцементного отношения (в очень подвижных и литых смесях). Расслоение, вызванное осаждением крупных частиц и выделением воды на верхней поверхности уложенного бетона, часто можно наблюдать визуально.

Расслоение, вызываемое постепенным осаждением цементных зерен, обычно заметить труднее. При правильно подобранном составе бетона оно не должно иметь место. И. Н. Ахвердов установил, что имеется определенный диапазон V/C , при которых расслоение цементного теста не происходит. Для портландцемента это $V/C = (0,865 \dots 1,65) НГ$, где $НГ$ — нормальная плотность цементного теста. Нижнее значение V/C определяет границу, выше которой образуется связанное цементное тесто, верхнее значение — водоудерживающую способность цементного теста. При

больших В/Ц начинается отделение лишней воды. Значения предельных В/Ц зависят от состава цемента, использованных добавок и других факторов.

Склонность к расслоению можно уменьшить, применяя химические (гидрофобные вещества или стабилизаторы) или тонкомолотые добавки с развитой удельной поверхностью (трепел, золы, бентонитовые глины и др.).

§ 3.2. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ

Формирование свойств бетона начинается с приготовления, укладки и затвердевания бетонной смеси. Эти операции во многом определяют будущее качество бетона и изделия. Поэтому очень важно хорошо знать свойства бетонной смеси, зависимость их от различных факторов, уметь управлять процессами приготовления, укладки и затвердевания бетонной смеси.

● *Наиболее важным свойством бетонной смеси является удобоукладываемость или формуемость, т. е. способность смеси растекаться и принимать заданную форму, сохраняя при этом монолитность и однородность. Удобоукладываемость определяется подвижностью (текучестью) бетонной смеси в момент заполнения формы и пластичностью, т. е. способностью деформироваться без разрыва сплошности.*

Для описания поведения бетонной смеси в различных условиях используют ее реологические характеристики: предельное напряжение сдвига, вязкость и период релаксации. Для определения этих свойств применяют специальные вискозиметры. Подобные испытания выполняют главным образом в научно-исследовательских лабораториях. В производственных же условиях контролируют чаще всего подвижность (текучесть) смеси, для чего применяют приборы, позволяющие быстро и сравнительно просто получать необходимую характеристику бетонной смеси.

Для полной оценки бетонной смеси и правильной организации производства бетонных и железобетонных изделий и конструкций необходимо знать и другие свойства смеси: ее *уплотняемость, однородность, расслаиваемость, изменение объема в процессе затвердевания, воздухововлечение, первоначальную прочность* (для жестких бетонных смесей при применении немедленной распалубки изделий).

Особенностью бетонной смеси является практически *постоянное изменение свойств* ее от начала приготовления до затвердевания, что обуславливается сложными физико-химическими процессами, протекающими в бетонной смеси и бетоне. Как уже указывалось, бетонная смесь представляет собой сложную многокомпонентную систему. Вследствие наличия сил взаимодействия между дисперсными частицами твердой фазы и воды эта система приобретает связанность и может рассматриваться как единое

физическое тело с определенными реологическими, физическими и механическими свойствами.

Основное влияние на эти свойства оказывают *количество и качество цементного теста*, так как именно цементное тесто, являясь дисперсной системой, имеет высокоразвитую поверхность раздела твердой и жидкой фаз, что способствует развитию сил молекулярного сцепления и повышению связанности системы. Решающее влияние на свойства бетонной смеси оказывает расход воды, так как он определяет объем и строение жидкой фазы и развитие сил сцепления, характеризующих связанность и подвижность всей системы.

В процессе гидратации цемента (до момента затвердевания) появляется все большее количество гелеобразных гидратных соединений новообразований, что способствует увеличению дисперсности твердой фазы и соответственно повышению клеящей и пластифицирующей способности цементного теста и его связующей роли в бетонной смеси. Вместе с тем постепенно уменьшается подвижность смеси.

Цементное тесто относится к так называемым структурированным системам, которые характеризуются некоторой *начальной прочностью структуры*. В цементном тесте создается структура за счет действия сил молекулярного сцепления между частицами, окаймленными тонкими пленками воды. Пленки жидкой фазы создают непрерывную пространственную сетку в структуре цементного теста, придавая ему свойство пластичности и способствуя формоизменению системы (течению) при приложении внешних силовых воздействий. Начальная прочность структуры, или структурная вязкость, цементного теста зависит от концентрации твердой фазы в водной суспензии.

Обычно бетонные смеси содержат достаточное количество цементного теста и воды для создания сплошной среды. Такие смеси ведут себя подобно цементному тесту, обладая первоначальной прочностью структуры, определенными пластичностью и подвижностью.

Поведение структурированных систем при приложении внешних сил существенно отличается от поведения жидкостей. Если вязкость жидкости (истинная ньютоновская) является постоянной и не зависит от значения прикладываемого давления (вязкость жидкости меняется только с изменением температуры), то вязкость структурированных систем изменяется даже при постоянной температуре в несколько раз (часто на 2...3 порядка) в зависимости от значения внешних сил, действующих на систему. Вязкость зависит от значения напряжения сдвига системы или скорости сдвиговых деформаций.

Под действием внешних сил происходит как бы разрыхление первоначальной структуры, ослабевают связи между ее отдельными элементами, а в результате возрастает способность системы

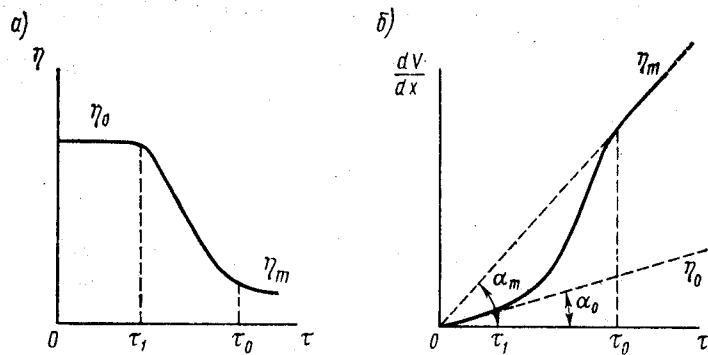


Рис. 3.18. Изменение вязкопластических свойств бетонной смеси от напряжений сдвига: а — структурной вязкости; б — скорости деформации течения (α_0 и α_m — углы, характеризующие значения коэффициентов вязкости системы)

к деформациям (течению), увеличивается ее подвижность. При достижении критической скорости сдвига, когда первоначальная структура системы предельно разрушена, вязкость и сопротивление сдвигу достигают минимальных значений и даже малоподвижные смеси приобретают определенную текучесть. После окончания действия внешних сил система возвращается в первоначальное состояние, восстанавливается начальная прочность структуры, уменьшается подвижность.

● *Способность структурированных систем изменять свои реологические свойства под влиянием механических воздействий и восстанавливать их после прекращения воздействия называется тиксотропией.* В технологии бетона это свойство широко используют для формирования изделий из малоподвижных и жестких смесей путем воздействия на них вибраций, встряхиванием, толчками.

Представление о поведении бетонной смеси при воздействии на нее внешних сил дает реологическая кривая (рис. 3.18), которую можно разделить на три участка. На первом участке при небольших значениях напряжений сдвига τ сохраняется неразрушенная первоначальная структура бетонной смеси, характеризующаяся наибольшей вязкостью η_0 . После достижения критического напряжения τ_1 , соответствующего пределу текучести системы, начинается разрушение структуры, которое продолжается вплоть до полного разрушения при предельном напряжении τ_0 . На этом втором участке по мере разрушения системы эффективная вязкость бетонной смеси постоянно падает при увеличении напряжений сдвига. После того как система предельно разрушена, бетонная смесь приобретает наименьшую вязкость (так называемую пластическую вязкость η_m — третий участок кривой), которая не

зависит от значений действующих напряжений и не изменяется при их увеличении.

Как показали исследования, реологическая модель невибрируемой бетонной смеси может быть описана уравнением Шведова — Бингама

$$\tau = \tau_0 + \eta_m \frac{dv}{dx}, \quad (3.1)$$

где η_m — пластическая (остаточная) вязкость системы, которая может рассматриваться как коэффициент пропорциональности (коэффициент вязкости) между напряжением и скоростью сдвига; dv/dx — градиент скорости сдвига.

Это уравнение характеризует поведение бетонной смеси при транспортировании по трубкам с помощью бетононасосов и при укладке очень подвижной смеси некоторыми безвибрационными способами.

При вибрировании бетонной смеси ее начальная структура предельно разрушается, внутреннее трение и силы сцепления уменьшаются до минимума, в полной мере проявляется эффект тиксотропного разжижения и предельное напряжение сдвига становится очень малым. Так, по данным А. Е. Десова, предельное напряжение сдвига для раствора состава 1:2 равно 10^2 Па, для более жирных растворов еще меньше. В этих условиях поведение бетонной смеси с определенной степенью приближения можно описать уравнением Ньютона

$$\tau = \eta_m \frac{dv}{dx}.$$

С повышением содержания в бетонной смеси крупного заполнителя и уменьшением содержания воды или отсутствием сплошной среды из цементного теста сопротивление сдвигу значительно увеличивается. В системе не только повышается вязкое трение, но и возникает внутреннее сухое трение между зернами заполнителя. Для описания поведения таких смесей применяют уравнение Кулона

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + \eta_{ст}, \quad (3.2)$$

где σ — нормальное напряжение; φ — угол внутреннего трения; $\eta_{ст}$ — структурная вязкость системы.

Рассмотренные выше выражения, описывающие реологические свойства бетонной смеси, основываются на феноменологических представлениях, в которых бетонная смесь принимается за однородную изотропную среду, характеризующуюся интегральными показателями: вязкостью, предельным напряжением сдвига, коэффициентом внутреннего трения и др. Такие представления полез-

ны при рассмотрении ряда технологических вопросов транспорта бетонной смеси, выгрузки смеси из бункеров, формирования изделий и т. д. На основе полной реологической кривой и полученных реологических характеристик можно наиболее рационально подобрать технологию изготовления изделий из данной бетонной смеси.

На практике, однако, часто приходится решать задачу о подборе состава бетонной смеси, наилучшим образом отвечающего данной технологии изготовления конструкций. Для решения подобных задач необходимо знать взаимосвязь между составом бетонной смеси и ее реологическими свойствами. Для оценки последних в производственных условиях применяют упрощенные методы, получая технологические характеристики бетонной смеси: показатель жесткости, осадку конуса и др., которые характеризуют поведение смеси в определенных условиях и служат для ориентировочной оценки способности смеси к формоизменению и уплотнению при тех или иных условиях воздействия. Преимущество технических методов определения подвижности бетонной смеси — быстрота испытания и сравнительная простота используемых приборов, доступных для любой строительной лаборатории. Однако на основе этих испытаний нельзя получить полной реологической кривой бетонной смеси и соответственно полных данных о ее реологических свойствах.

□ Для получения реологических характеристик бетонной смеси применяют специальные приборы и вискозиметры, которые по принципу действия можно разделить на пять групп (рис. 3.19): 1. Приборы, основанные на определении скорости истечения цементного теста или бетонной смеси через капилляр, трубку или отверстие определенной формы и размера. Испытание можно проводить под действием заданного давления. Эти приборы чаще всего используют для оценки реологических свойств цементного теста. 2. Приборы, основанные на измерении глубины проникания

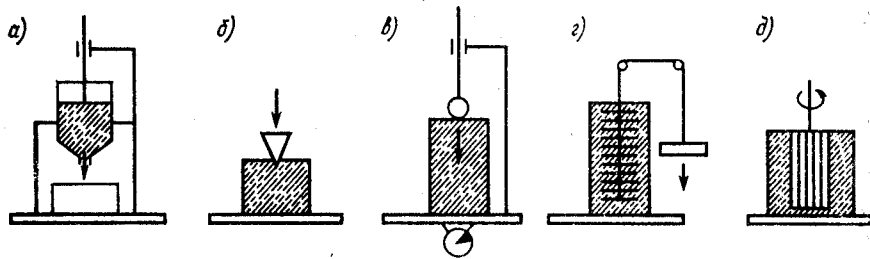


Рис. 3.19. Схемы приборов для определения реологических свойств цементного теста и бетонной смеси:

а — по измерению скорости истечения смеси через отверстие; б — по измерению глубины проникания конуса; в — по скорости погружения шарика; г — по усилию выдергивания; д — по усилию вращения коаксиальных цилиндров

в цементное тесто или бетонную смесь конуса или иного тела (конический пластомер МГУ и др.). Наиболее точные результаты получают при испытании цементного теста. 3. Приборы, основанные на определении скорости погружения или всплывания шарика определенной массы и размеров (прибор Десова и др.). Испытания обычно проводят при вибрировании смеси. 4. Приборы, основанные на измерении усилия выдергивания из смеси рифленых пластинок, стержней или цилиндров. 5. Приборы, основанные на вращении коаксиальных цилиндров, между которыми находится бетонная смесь. При этом может вращаться либо внутренний, либо внешний цилиндр. При испытании измеряются частота вращения и усилие, необходимое для преодоления сопротивления бетонной смеси.

При определении реологических свойств бетонной смеси или цементного теста часто используют вибрационные воздействия. В этом случае вискозиметры либо устанавливают на вибрационные устройства, либо в их конструкции предусматривают возможность создания вибрационного воздействия часто с широкими изменениями параметров (частоты и амплитуды колебаний). Подобные испытания необходимы, так как на практике широко используют вибрацию для транспорта и укладки бетонной смеси в конструкции и изделия.

Следует заметить, что точность и корректность определения реологических свойств бетонной смеси зависят от ее структуры и состава. Чем выше однородность, тем корректнее испытание. Наилучшие результаты достигаются при испытании цементных паст. С увеличением содержания заполнителя, особенно крупного, повышается роль трения и случайных факторов, возрастает разброс результатов испытаний. Необходимо учитывать, что состав бетонной смеси и крупность составляющих определяют размеры используемых вискозиметров: с увеличением крупности составляющих должны увеличиваться объемы испытываемой бетонной смеси и рабочие размеры приборов, которые в действующих сечениях должны быть в 3...4 раза больше предельного размера крупного заполнителя.

Сравнительно просто можно определить структурную вязкость смеси при погружении или всплытии шарика в бетонной смеси на упрощенной установке, показанной на рис. 3.20. В этом случае

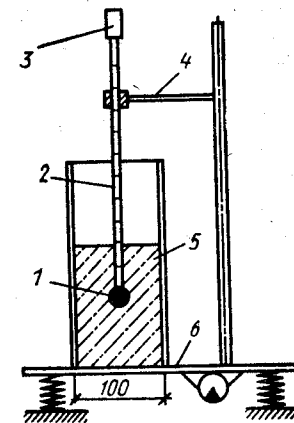


Рис. 3.20. Схема простейшего шарикового вискозиметра:

1 — стальной шарик; 2 — измерительная штанга; 3 — пригруз; 4 — штатив; 5 — форма; 6 — вибростол

$$\eta = K(\rho_1 - \rho_2)t,$$

(3.3)

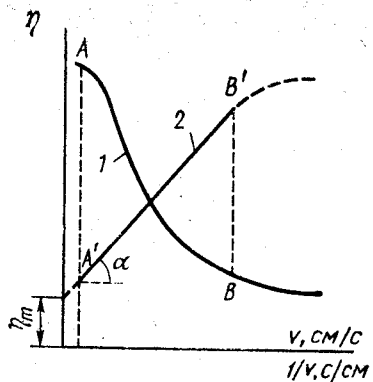


Рис. 3.21. Зависимость структурной вязкости η_m бетонной смеси от скорости v и величины $1/v$, обратной скорости колебаний

кости на участке AB преобразуется в прямую $A'B'$ при замене скорости колебаний на ее обратную величину $1/v$. В этом случае структурная вязкость

$$\eta = \eta_m a/v, \quad (3.4)$$

где η_m — вязкость предельно разрушенной структуры; a — коэффициент тиксотропии; v — скорость колебаний.

На основе этой зависимости можно ориентировочно определить вязкость бетонной смеси при любой скорости колебаний, а по ней — общее сопротивление системы колебаний и потребляемую мощность, если известны η_m и a . Проведено большое количество опытов по определению этих характеристик и выявлению зависимости их от исходных материалов и состава бетона.

Заметное влияние на реологические свойства бетонной смеси оказывают *минералогический состав и тонкость помола цемента*. Академик П. А. Ребиндер показал, что более выраженной тиксотропией обладают цементы с повышенным содержанием алюминатов, что обусловлено большей пептизацией подобных материалов при вибрации. Вязкость бетонной смеси на высокоалюминатных цементах в большей мере зависит от скорости колебаний, чем при применении низкоалюминатных цементов.

Существенное влияние на структурную вязкость и тиксотропию оказывает тонкость помола цемента. Вначале с повышением тонкости помола структурная вязкость предельно разрушенной структуры и коэффициент тиксотропии уменьшаются. При тонкости помола 4500...6000 $\text{см}^2/\text{г}$ наблюдаются минимальные значения этих величин, а при дальнейшем увеличении тонкости помо-

ла структурная вязкость и коэффициент тиксотропии возрастают (рис. 3.22).

Подобное явление наблюдается и при испытании других порошкообразных материалов. Это обусловлено тем, что только при определенной тонкости помола цемента или другого тонкомолотого материала достигается оптимальное распределение воды в системе, при котором создаются наилучшие условия для скольжения твердых частиц и до минимального уменьшения внутреннего трения.

В смесях с более тонкомолотыми частицами значительно возрастают силы внутреннего сцепления за счет действия межмолекулярных и адгезионных сил, уменьшается толщина водных прослоек и, как результат, возрастает структурная вязкость смеси. Вибрационное воздействие, вызывающее ослабление сил внутреннего воздействия, в этом случае оказывает большое влияние на изменение свойств смеси, что выражается в повышении коэффициента тиксотропии.

В смесях с более грубым помолом твердой фазы все большее значение приобретают силы внутреннего трения, так как значительная часть воды располагается в пустотах, а не между зернами материала, не играя роль активной смазки, и структурная вязкость смеси возрастает. Вибрация, способствующая уменьшению внутреннего трения, в этом случае заметно влияет на изменение реологических свойств смеси, что выражается в увеличении коэффициента тиксотропии.

При применении зерен еще больших размеров (песка, крупного заполнителя) внутреннее трение будет продолжать возрастать. По исследованиям Р. Лермита, коэффициент кажущегося трения $k_{к.тр} = (\pi/2) \text{tg}\phi$ (где $\pi/2$ — так называемый коэффициент переплетения, устанавливающий взаимосвязь между коэффициентом кажущегося трения и коэффициентом физического трения) увеличивается в зависимости от среднего диаметра d зерен данной смеси в соответствии с выражением

$$k_{к.тр} = \log a d^b, \quad (3.5)$$

где a — коэффициент, $a \approx 1,3$; b — коэффициент, $b \approx 0,22$.

где K — константа прибора, обычно устанавливаемая градуированием на смеси или жидкости (например, глицерина) с известной вязкостью или путем сравнения вязкости, полученной на приборе, с вязкостью, определенной на специальных вискозиметрах (ротационных и др.): ρ_1 — плотность бетонной смеси; ρ_2 — плотность шарика; t — время погружения или всплытия шарика на определенную глубину.

Для практических целей А. Е. Десов предложил характеризовать реологическую кривую двумя предельными или близкими к ним значениями вязкости (рис. 3.21, точки A и B). Кривая вязкости на участке AB преобразуется в прямую $A'B'$ при замене скорости колебаний на ее обратную величину $1/v$. В этом случае структурная вязкость

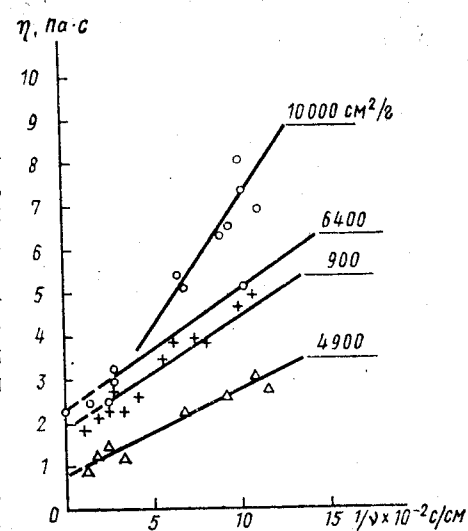


Рис. 3.22. Реологические характеристики цементного теста из различных фракций цемента при $V/C=0,325$, частоте 3000 кол/мин

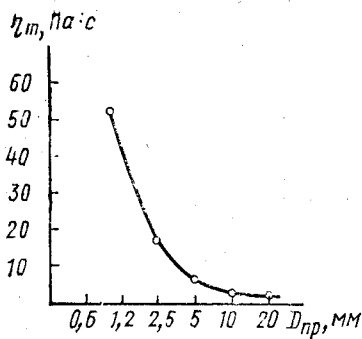


Рис. 3.23. Влияние крупности $D_{пр}$ заполнителя на реологические свойства бетонной смеси

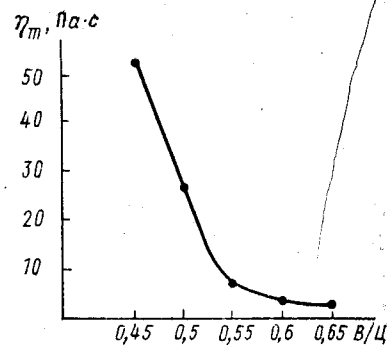


Рис. 3.24. Зависимость структурной вязкости η_t предельно разрушенной структуры цементного раствора состава 1:3 от $В/Ц$ при частоте 3000 кол/мин

Коэффициент кажущегося трения показывает влияние на реологические свойства бетона заполнителя. При вибрации скелет из твердых зерен заполнителя разрушается, заклинивание отдельных частиц устраняется и внутреннее трение резко уменьшается. По окончании вибрации зерна в такой смеси располагаются более компактно и соответственно возрастают силы внутреннего сцепления и трения.

На рис. 3.23 показано изменение реологических характеристик в зависимости от *крупности зерен твердой фазы*. С уменьшением размера среднего зерна уменьшается кажущееся трение, но возрастает предельное напряжение сдвига. Структурная вязкость предельно разрушенной структуры или связанная с ней потребляемая мощность вибратора оказывается минимальной при определенной крупности зерен твердой фазы или при определенном соотношении мельчайших частиц (цемента) и крупных частиц (заполнителя). При этом мельчайшие фракции песка или тонкомолотые минеральные добавки будут оказывать влияние на реологические свойства бетонной смеси подобно частицам цемента.

Другими словами, в бетонной смеси существует такое соотношение между цементом и заполнителем, в том числе между песком и щебнем, при котором структурная вязкость смеси будет наименьшая, подвижность — наибольшая, а для ее уплотнения требуется затратить наименьшее количество энергии. Применяемые в настоящее время способы определения состава бетона учитывают это обстоятельство.

Большое влияние на реологические свойства бетонной смеси оказывает *соотношение между водой и цементом и между водой и твердой фазой*. На рис. 3.24 показано влияние водоцементного отношения на структурную вязкость цементного раствора, полу-

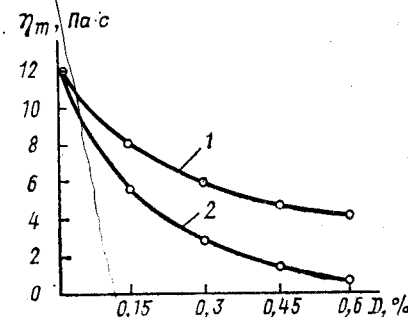


Рис. 3.25. Влияние пластифицирующей добавки на структурную вязкость η_t раствора состава 1:3: 1 — добавка СДБ; 2 — добавка суперпластификатора типа «Мельмент»

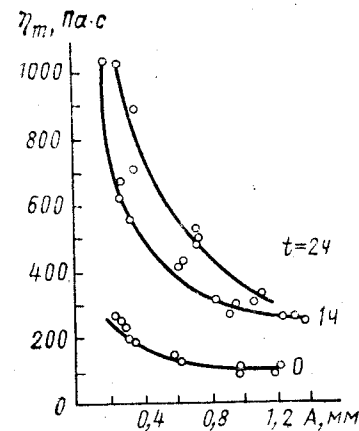


Рис. 3.26. Изменение структурной вязкости η_t раствора состава 1:3 при $В/Ц=0,55$ в процессе выдерживания после приготовления

ченное в опытах А. Е. Десова. С увеличением $В/Ц$ структурная вязкость и коэффициент тиксотропии резко уменьшаются. Следует заметить, что уменьшение структурной вязкости наблюдается и при уменьшении $В/Ц$ [левая ветвь кривой $\eta_t=f(В/Ц)$], однако в этом случае только условно можно говорить о структурной вязкости, так как в действительности при очень низких $В/Ц$ смесь просто теряет связанность и рассыпается и ее нельзя рассматривать как сплошную массу с определенными свойствами. Цементное тесто и бетонная смесь могут сохранять связанность только в определенном интервале значений $В/Ц$, величина которых зависит от реологических свойств цемента, заполнителей и состава бетонной смеси. При высоких значениях $В/Ц$ начинается расслоение бетонной смеси, оседание зерен твердой фазы, образование пустот, заполненных водой, вытекание избыточной воды из смеси, так как бетонная смесь уже не способна удержать в связанном состоянии повышенное содержание воды. Нарушается однородность смеси, резко возрастает разброс результатов при определении реологических характеристик. Такие смеси непригодны для использования.

Структурную вязкость бетонной смеси можно значительно уменьшить при применении пластифицирующих добавок (рис. 3.25). Эффективность применения добавок зависит от вида и дозировки добавки, вида цемента, состава бетона.

Как уже говорилось, реологические свойства бетонной смеси не остаются постоянными и под влиянием физико-химических

процессов, протекающих при взаимодействии цемента и воды, постепенно изменяются: *повышаются вязкость и предельное напряжение сдвигу* (рис. 3.26). Степень изменения реологических свойств зависит от *вида цемента, водоцементного отношения, состава бетона, температуры бетонной смеси, применяемых добавок и других факторов*. Понижение В/Ц и повышение температуры бетонной смеси вызывает повышение структурной вязкости и предельного напряжения сдвига бетонной смеси.

§ 3.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОННОЙ СМЕСИ

Для производства работ и обеспечения высокого качества бетона в конструкции необходимо, чтобы бетонная смесь имела консистенцию, соответствующую условиям ее укладки. Консистенция бетонной смеси зависит от ее состава и может изменяться от жесткой, едва влажной, до густой (тестообразной) и жидкой, легко растекающейся. Для оценки консистенции бетонной смеси и ее технологических свойств, определяющих способность заполнять данную форму и уплотняться в процессе укладки, предложено много способов. Обычно технологические свойства оцениваются показателем подвижности или жесткости бетонной смеси.

Для определения *подвижности*, т. е. способности смеси расплываться под действием собственной массы и связанности бетонной смеси, служит *стандартный конус*. Он представляет собой усеченный, открытый с обеих сторон конус из листовой стали толщиной 1 мм. Высота конуса 300 мм, диаметр нижнего основания 200 мм, верхнего 100 мм. Внутреннюю поверхность формы-конуса и поддон перед испытанием смачивают водой. Затем форму устанавливают на поддон и заполняют бетонной смесью в три приема, уплотняя смесь штыкованием. После заполнения формы и удаления излишков смеси форму тотчас снимают, поднимая ее медленно и строго вертикально вверх за ручки. Подвижная бетонная смесь, освобожденная от формы, дает осадку. Мерой подвижности смеси служит величина осадки конуса, которую измеряют сразу же после снятия формы (рис. 3.27). Из каждого замеса пробу берут два раза, измеряют осадку конуса и принимают средний результат. В зависимости от осадки конуса различают малоподвижные (пластичные) (1...4 см), подвижные (5...11 см), очень подвижные (12...19 см) и литые (более 20 см) бетонные смеси.

При малых расходах воды бетонные смеси не показывают осадки конуса, однако при приложении внешнего силового воздействия такие смеси (в зависимости от расхода воды и состава бетона) обладают различными формовочными свойствами. Такие смеси называют жесткими. Для оценки их свойств используют стандартный вискозиметр, с помощью которого определяют растекаемость бетонной смеси при вибрировании. Прибор состоит из цилиндрического сосуда высотой 200 мм с внутренним диаметром

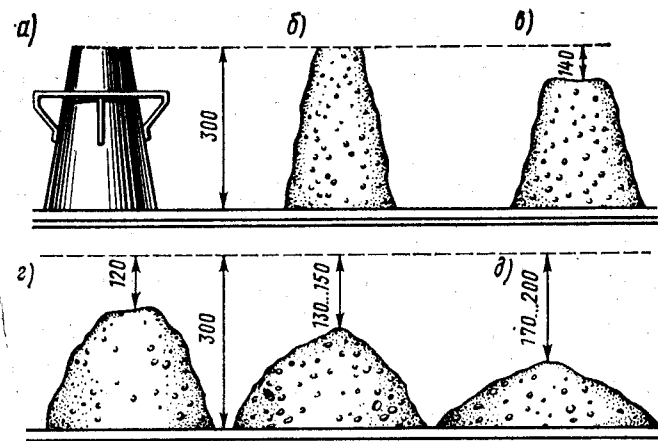


Рис. 3.27. Определение подвижности бетонной смеси с помощью конуса:
а — общий вид; б — жесткая смесь; в — малоподвижная; г — подвижная; д — литая

240 мм, на котором закреплено устройство для измерения осадки бетонной смеси в виде направляющего штатива, штанги и металлического диска толщиной 4 мм с шестью отверстиями (рис. 3.28).

Прибор устанавливают на виброплощадку и плотно прикрепляют к ней. Затем в сосуд помещают металлическую форму-конус с насадкой для наполнения бетонной смесью. Размеры формы-конуса такие же, как при определении подвижности бетонной смеси. Форму-конус с помощью специального кольца-держателя закрепляют в приборе и заполняют тремя слоями бетонной смеси, уплотняя ее штыкованием (25 раз каждый слой). Затем укрепляют форму-конус, поворачивают штатив, устанавливают на по-

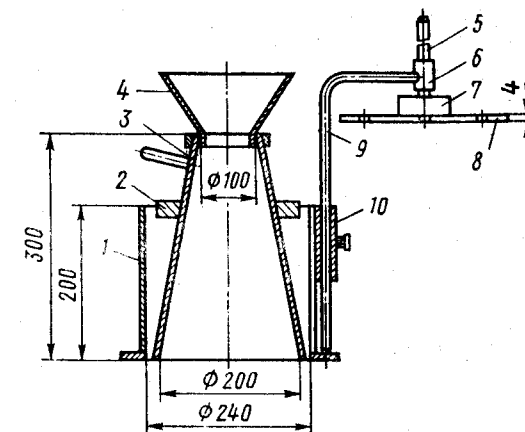


Рис. 3.28. Прибор для определения жесткости бетонной смеси:

1 — форма; 2 — упоры для крепления конуса; 3 — конус; 4 — воронка; 5 — штанга; 6 — направляющая втулка; 7 — втулка для крепления диска; 8 — диск с шестью отверстиями; 9 — штатив; 10 — зажим штатива

верхности бетонной смеси диск и включают виброплощадку. Вибрирование при амплитуде 0,5 мм продолжают до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из двух отверстий диска. Полученное время вибрирования — показатель жесткости бетонной смеси.

В ряде действующих нормативных документов и инструкций жесткость бетонной смеси указывается по результатам ранее использовавшейся методики ее определения с помощью *технического вискозиметра*. По этой методике бетонная смесь, уложенная в стандартный конус, при вибрировании растекается в цилиндрическом сосуде высотой 200 мм и диаметром 300 мм, внутри которого установлено цилиндрическое кольцо диаметром 216 мм и высотой 130 мм. Между нижней кромкой кольца и дном сосуда имеется зазор, величина которого устанавливается в зависимости от крупности щебня: зазор должен быть 70 мм, при предельной крупности 40 мм, 50 мм при крупности заполнителя 20 мм, 30 мм при крупности заполнителя 10 мм. Растекание смеси контролируется по перемещению диска со штоком, установленного на ее поверхности. Показатель жесткости бетонной смеси определяется временем, необходимым для опускания диска в нижнее положение. Внутреннее кольцо затрудняет растекание смеси, и поэтому одна и та же смесь имеет показатель жесткости по старому техническому вискозиметру в 3,5 ... 5 раз выше, чем при испытании в стандартном вискозиметре.

В лабораториях иногда используют упрощенный способ определения жесткости бетонной смеси, предложенный Б. Г. Скрамтаевым. В обычную металлическую форму для приготовления кубов размером 20×20×20 см вставляют стандартный конус. Предварительно с него снимают упоры и немного уменьшают нижний диаметр, чтобы конус вошел внутрь куба (рис. 3.29). Наполняют конус в три слоя. После снятия металлического конуса бетонную смесь подвергают вибрации на лабораторной виброплощадке.

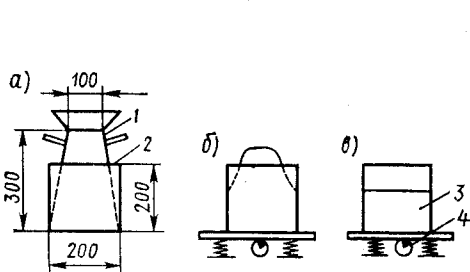


Рис. 3.29. Определение удобоукладываемости бетонной смеси упрощенным способом: а — общий вид прибора; б — бетонная смесь до вибрирования; в — то же, после вибрирования; 1 — конус; 2 — форма куба; 3 — бетонная смесь; 4 — виброплощадка

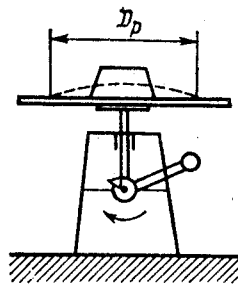


Рис. 3.30. Столик для определения распыла конуса при встряхивании

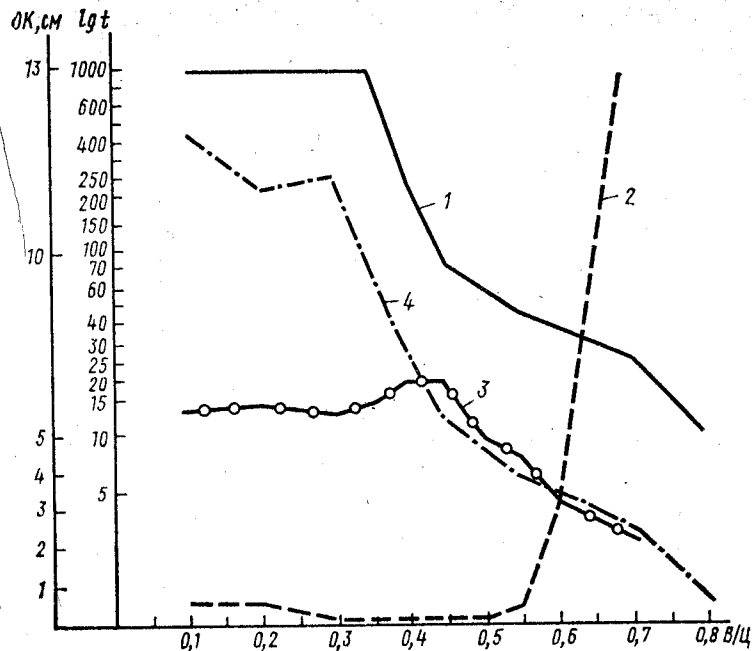


Рис. 3.31. Сравнение результатов определения технологических свойств бетонной смеси разными способами: 1 — по техническому вискозиметру; 2 — по осадке конуса; 3 — по способу Б. Г. Скрамтаева; 4 — по способу Вебе

Вибрация длится до тех пор, пока бетонная смесь не заполнит всех углов куба и ее поверхность не станет горизонтальной. Продолжительность вибрирования (с) принимают за меру жесткости (удобоукладываемости) бетонной смеси. Стандартная виброплощадка должна иметь следующие параметры: кинематический момент 0,1 Н·м; амплитуду 0,5 мм; частоту колебаний 3000 мин⁻¹. Как показали опыты, показатель жесткости, определенный на стандартном приборе, приблизительно в 1,5...2 раза меньше этого показателя, полученного по способу Б. Г. Скрамтаева.

В строительной практике используют и другие способы оценки подвижности или консистенции смеси. Так, для определения подвижности растворной смеси применяют так называемый *конус СтройЦНИЛа*. В этом случае подвижность смеси устанавливают по глубине погружения в растворную смесь стального конуса высотой 145 мм, диаметром основания 75 мм и массой 300 г. Это очень простой способ испытания, который можно проводить в процессе транспортирования и укладки раствора.

Для определения консистенции растворной смеси при испытании цементов используют *распływ конуса на встряхивающем*

столике (рис. 3.30). Испытание показывает изменение подвижности различных мелкозернистых композиций и может успешно применяться при испытании цементно-песчаных смесей.

Для определения подвижности и жесткости бетонной смеси могут использоваться некоторые из приборов, рассматривающихся в § 3.2. При этом следует учитывать два обстоятельства. Во-первых, каждый метод испытаний наиболее пригоден для конкретных условий и составов бетонной смеси, где он обеспечивает необходимую точность измерений. На рис. 3.31 показаны результаты определения удобоукладываемости бетонной смеси различными способами в зависимости от В/Ц при расходах цемента 300...400 кг/м³, полученные в опытах А. Е. Десова. Метод определения подвижности по осадке конуса можно использовать только с В/Ц=0,45, в то время как технический визкозиметр измеряет жесткость смеси при В/Ц=0,3...0,7. Однако при больших В/Ц точность измерения значительно уменьшается. Другие способы имеют свои границы применения.

Во-вторых, поскольку методы, применяемые при определении удобоукладываемости смеси, не характеризуют ее основных реологических свойств, а определяют условные показатели, получаемые испытанием в различных условиях, то получение истинных зависимостей между этими показателями невозможно. Бетонные смеси с одинаковой осадкой конуса, но отличающиеся составом или приготовленные на разных материалах, могут иметь различные показатели жесткости, и наоборот. Поэтому получение корреляционных зависимостей возможно только для бетонных смесей, приготовленных на близких по свойствам материалах и не слишком отличающихся по составам. Это необходимо учитывать при разработке и применении особых датчиков и приборов по регистрации технологических свойств бетонной смеси.

§ 3.4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОДВИЖНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

Технологические свойства бетонной смеси определяются ее составом и свойствами используемых материалов.

● *Связанность (способность растекаться и плотно заполнять форму) бетонной смеси придает цементное тесто.* Чем выше содержание цементного теста, чем более жидкой является его консистенция, тем больше подвижность бетонной смеси. Введение в цементное тесто заполнителя уменьшает подвижность смеси, причем тем больше, чем выше содержание заполнителя и его удельная поверхность.

При изменении расхода цемента в бетоне от 200 до 400 кг/м³ при постоянном расходе воды изменения подвижности бетонной смеси очень малы и практически их можно не учитывать, при-

нимая подвижность постоянной. Подвижность смеси изменяется только при изменении расхода воды. Эта закономерность, получившая название закона постоянства водопотребности и позволяющая в расчетах использовать упрощенную зависимость подвижности бетонной смеси только от расхода воды, объясняется следующим образом. Увеличение содержания цемента в бетонной смеси повышает толщину обмазки зерен заполнителя цементным тестом. Однако при этом уменьшается отношение Ц/В (при постоянном расходе воды), т. е. влияние этих факторов, один из которых должен был бы увеличивать, а второй — уменьшать консистенцию бетонной смеси, суммируется таким образом, что изменение расхода цемента в указанных пределах не влияет на подвижность бетонной смеси.

С увеличением содержания цементного теста при постоянном В/Ц или с уменьшением количества заполнителей подвижность бетонной смеси возрастает, а прочность остается практически неизменной. Если цементное тесто взять только в количестве, необходимом для заполнения пустот между заполнителями, то бетонная смесь получается жесткой, неудобоукладываемой. Для того чтобы смесь стала подвижной, следует не только заполнить пустоты, но и раздвинуть зерна заполнителя прослойками из цементного теста. В зависимости от свойств заполнителя и соотношения между песком и щебнем минимальное содержание цементного теста в бетонной смеси, обеспечивающее ее нерасслаиваемость и качественное уплотнение, составляет от 170...200 л в жесткой смеси до 220...270 л в подвижной и литой смесях.

● *Влияют на подвижность бетонной смеси и свойства цемента.* Применение цемента с более высокой нормальной густотой понижает подвижность бетонной смеси (при постоянном расходе воды). Бетонные смеси, содержащие пуццолановый портландцемент с активной кремнеземистой добавкой, особенно осадочного происхождения (трепелы, диатомиты), при одном и том же расходе воды имеют значительно меньшую осадку конуса, чем смеси с обычным портландцементом.

● *С повышением содержания воды подвижность бетонной смеси увеличивается* (но если расход цемента остается постоянным, то прочность бетона понижается). Однако каждая бетонная смесь обладает определенной водоудерживающей способностью; при большем содержании воды часть ее отделяется от бетонной смеси, что недопустимо. Изменение содержания воды — главный фактор, с помощью которого регулируют консистенцию бетонной смеси.

Подвижность бетонной смеси существенно зависит от *крупности зерен заполнителя*. С увеличением крупности зерен суммарная площадь их поверхности уменьшается, снижается их влияние на цементное тесто, в результате подвижность бетонной смеси возрастает. Пыль, глинистые и другие загрязняющие примеси обычно снижают подвижность жирной бетонной смеси.

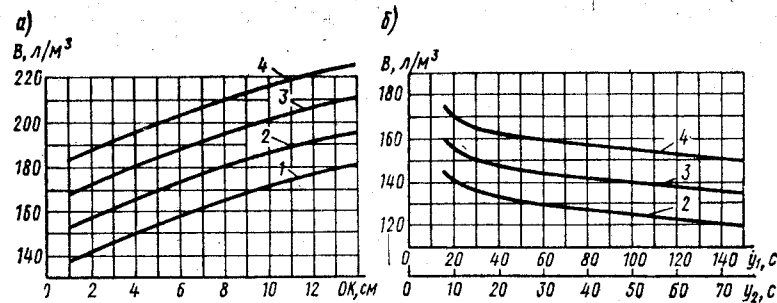


Рис. 3.32. График водопотребности V пластичной (а) и жесткой (б) бетонной смеси, изготовленной с применением потландцемента, песка средней крупности (водопотребность 7 %) и гравия наибольшей крупности:

1 — 80 мм; 2 — 40 мм; 3 — 20 мм; 4 — 10 мм; y_1 — удобоукладываемость по техническому вискозиметру; y_2 — то же, по способу В. Г. Скрамтаева.
 П р и м е ч а н и я: 1. Если применяют мелкий песок с водопотребностью свыше 7%, то расход воды увеличивают на 5 л на каждый процент увеличения водопотребности; при применении крупного песка с водопотребностью ниже 7 % расход воды уменьшают на 5 л на каждый процент уменьшения водопотребности. 2. При применении щебня расход воды увеличивают на 10 л. 3. При применении пуццолановых цементов расход воды увеличивают на 15...20 л. 4. При расходе цемента свыше 400 кг расход воды увеличивают на 10 л на каждые 100 кг цемента

● **Подвижность зависит от соотношения между песком и щебнем.** Наилучшая подвижность достигается при некотором оптимальном соотношении, при котором толщина прослойки цементного теста максимальная. При содержании песка в смеси заполнителей сверх этого значения бетонная смесь делается менее подвижной, что объясняется увеличением площади поверхности смеси заполнителей (подробнее см. в гл. 10).

На рис. 3.32 приведена обобщенная зависимость, показывающая влияние различных технологических факторов на подвижность и водопотребность бетонной смеси. На основе данных этого рисунка можно ориентировочно назначить расход воды для пробных замесов при проектировании состава бетона.

● **Эффективным регулятором подвижности бетонной смеси являются добавки пластификаторов и суперпластификаторов** (см. § 2.3 и 3.1). Введение добавок позволяет энергично повысить подвижность бетонной смеси и уменьшает ее водопотребность, тем самым позволяя готовить бетонные смеси равной подвижности при меньшем расходе воды и цемента.

В табл. 3.3 приведены данные, показывающие ориентировочное снижение водопотребности бетонной смеси при введении пластификаторов (СДБ) или суперпластификаторов (С-3).

В жестких бетонных смесях эффективность действия пластификаторов и суперпластификаторов уменьшается, так как количество воды оказывается недостаточным для обеспечения их действия.

На производстве обычно требуется, чтобы подвижность бетонной смеси находилась в определенных пределах, например 2...

Таблица 3.3. Снижение водопотребности бетонной смеси при введении суперпластификаторов (в числителе) и пластификаторов (в знаменателе)

Жесткость, с	Подвижность, см	Расход цемента, кг/м³		
		500	400	300
—	15...18	23/16	20/14	17/12
—	8...10	21/14	17/12	15/10
5...10	1...4	18/12	14/10	12/8
20...30	—	13/10	12/8	9/6

... 4 см. Допустимо колебание водопотребности около 10 л, поэтому вполне возможно использовать ориентировочные зависимости, приведенные на рис. 3.32, с последующим уточнением расхода воды в пробных замесах.

Однако развитие технологии бетона, использование разнообразных материалов и способов приготовления бетонной смеси повышает возможность заметных отклонений водопотребности от средних значений, получаемых по ориентировочным зависимостям. Для повышения надежности технологии и обеспечения экономии цемента необходимо использовать более сложные многофакторные модели, применять ЭВМ (см. гл. 19). При использовании стандартных характеристик материалов определенное повышение точности технологических расчетов без их заметного усложнения может быть получено при применении интегральных характеристик заполнителей — их водопотребности, которые более точно учитывают влияние заполнителей на свойства бетонной смеси (см. гл. 2), и структурных характеристик бетонной смеси: эффективного или истинного $(V/C)_н$ и объемной концентрацией цементного теста c .

Под эффективным или истинным $(V/C)_н$ понимают такое водоцементное отношение, при котором бетонная смесь будет иметь ту же подвижность, что и цементное тесто. $(V/C)_н$ определяют, зная водопроницаемость песка и щебня:

$$(V/C)_н = (V - V_{пП} - V_{щЦ}) / C, \quad (3.6)$$

или

$$(V/C)_н = V/C - V_{пл} - V_{щт}, \quad (3.7)$$

где n и t — соотношение П/Ц и Щ/Ц. Значения $V_{п}$ и $V_{щ}$ подставляют в формулы (3.6), (3.7) в виде относительных величин.

Объемная концентрация цементного теста в бетонной смеси c выражается в долях от объема смеси:

$$c = \frac{C}{1000} \left[\frac{1}{\rho_{ц}} + \left(\frac{V}{C} \right)_н \right], \quad (3.8)$$

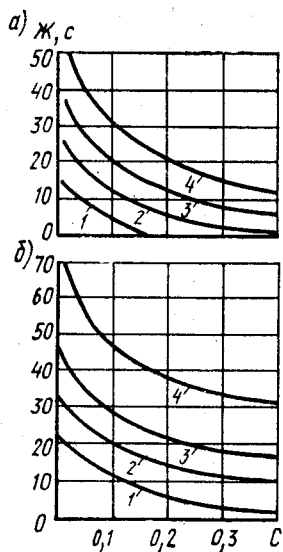


Рис. 3.33. Зависимость удобоукладываемости (жесткости) бетонной смеси на гранитном щебне (а) и керамзите (б) от объемной концентрации цементного теста и В/Ц:

1—В/Ц=0,2; 2—то же, 0,25;
3—0,3; 4—0,35

жесткости бетонной смеси учитывают при изготовлении бетонных и железобетонных смесей, назначая подвижность смеси в связи со сроками ее укладки. Для лучшего сохранения подвижности смеси во времени применяют специальные добавки, например СДБ.

где Ц — расход цемента, кг/м³; $\rho_{ц}$ — истинная плотность цемента.

При определении объемной концентрации не учитывают воду, связанную на поверхности заполнителя.

Использование структурных характеристик позволяет получать уточненные зависимости подвижности — состав бетонной смеси — свойства материалов при значительных колебаниях состава смеси и свойств исходных материалов. На рис. 3.33 приведены результаты определения жесткости бетонной смеси на гранитном щебне и керамзите, показывающие, что имеются четкие зависимости жесткости смеси от с и (В/Ц)_н, в то время как зависимость жесткости от расхода воды и цемента имеет значительно больший разброс результатов и, следовательно, меньшую точность.

Подвижность бетонной смеси с течением времени постепенно уменьшается вследствие физико-химического взаимодействия цемента и воды. Особенно сильно ухудшается удобоукладываемость жесткой бетонной смеси, поэтому такую смесь следует укладывать в формы как можно быстрее. Заметно снижается подвижность бетонной смеси при ее нагревании и использовании некоторых добавок. Понижение подвижности

По современным воззрениям, в начальный период при смешивании цемента с водой в процессе гидролиза трехкальциевого силиката выделяется гидроксид кальция, образуя пересыщенный раствор. В этом растворе находятся ионы сульфата, гидроксида и щелочей, а также небольшое количество кремнезема, глинозема и железа. Высокая концентрация ионов кальция и сульфат-ионов наблюдается непродолжительное время после затворения цемента водой, так как в течение нескольких минут из раствора начинают осажаться первые новообразования — гидроксид кальция и этрингит.

Приблизительно через час наступает вторая стадия гидратации, для которой характерно образование очень мелких гидросиликатов кальция. Вследствие того что в реакции принимают участие лишь поверхностные слои зерен цемента, вновь образующиеся гидратные фазы, получившие название цементного геля, характеризуются очень тонкой гранулометрией, размер зерен цемента уменьшается незначительно. Новообразования в первую очередь появляются на поверхности цементных зерен. С увеличением количества новообразований и плотности их упаковки пограничный слой становится малопроницаем для воды примерно в течение 2 ... 6 ч. Вторую стадию замедленной гидратации принято называть «скрытым или индукционным периодом» гидратации цемента.

В течение скрытого периода цементное тесто представляет собой плотную суспензию, стабилизированную действием флокулообразующих сил. Однако силы притяжения между цементными частицами в воде относительно слабы, что может быть объяснено следующим образом. Покрытые гелем зерна цемента образуют вокруг себя сольватный слой и имеют положительный ξ -потенциал. Совместное действие сольватного слоя и электрического заряда препятствует непосредственному контакту между соприкасающимися зернами. Вместе с тем эти зерна испытывают межчастичное притяжение, по крайней мере на некоторых пограничных участках. Силы отталкивания и притяжения уравниваются на некотором расстоянии от поверхности раздела, где потенциальная энергия частиц минимальна. Цементное тесто под действием этих сил приобретает связанность и подвижность.

В течение скрытого периода происходит постепенное поглощение поверхностными оболочками цементных зерен воды, толщина водных прослоек между зернами уменьшается, постепенно понижается подвижность теста и бетонной смеси. В гелевых оболочках появляется осмотическое давление. Внутренние слои цементных зерен, реагируя с водой, стремятся расширяться. В результате наступает разрушение гелевых оболочек, облегчается доступ воды в глубь цементных зерен, ускоряется процесс гидратации цемента.

Наступает третья стадия процесса гидратации. Она характеризуется началом кристаллизации гидроксида кальция из раствора. Этот процесс происходит очень интенсивно. Так как на этом

ГЛАВА 4

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ БЕТОНА

§ 4.1. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЕТОНА

● Структура бетона образуется в результате затвердевания (схватывания) бетонной смеси и последующего твердения бетона. Определяющее влияние на ее формирование оказывают гидратация цемента, его схватывание и твердение.

этапе количество гидратных фаз относительно мало, то в пространстве между частицами цемента происходит свободный рост тонких пластинок гидроксида кальция и гидросиликатов кальция и этtringита в виде длинных волокон, которые образуются одновременно. Волокна новообразований проходят через поры, разделяют их на более мелкие и создают пространственную связь, усиливая сцепления между гидратными фазами и зернами цемента. С увеличением содержания гидратных фаз между ними возникают непосредственные контакты, число которых увеличивается — цементное тесто схватывается, затвердевает, образуется цементный камень.

Образовавшаяся жесткая структура сначала является очень рыхлой, но постепенно она уплотняется: в заполненных водой порах этой структуры непрерывно появляются новые гидратные фазы. Объем пор и их размеры уменьшаются, возрастает количество контактов между новообразованиями, утолщаются и уплотняются гелевые оболочки на зернах цемента, срастающиеся в сплошной цементный гель, с включениями непрореагировавших центров цементных зерен. В результате возрастает прочность цементного камня и бетона. Схематически процесс преобразований, происходящих в системе цемент—вода в процессе гидратации цемента, показан на рис. 4.1.

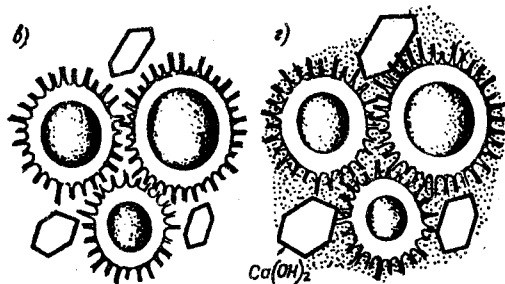


Рис. 4.1. Схема процесса преобразований в структуре цементного теста и камня при гидратации цемента:

а — цементные зерна в воде — начальный период гидратации; б — образование гелевой оболочки на цементных зернах — скрытый период гидратации; в — вторичный рост гелевой оболочки после осматического разрушения первоначальной оболочки, образование волнистых и столбчатых структур на поверхности зерен и в порах цементного камня — третий период гидратации; г — уплотнение структуры цементного камня при последующей гидратации цемента

гося этtringита в моносульфат после того, как весь двуводный гипс, введенный в цемент для увеличения сроков схватывания, вступит в реакцию с трехкальциевым алюминатом.

Процесс гидратации развивается на границах зерен и цементный гель растет одновременно внутрь и наружу, причем каждое зерно оказывается как бы упакованным в гель. Вода проникает через гелевую оболочку внутрь зерен, а часть компонентов гидратированного цемента диффундирует в противоположном направлении к внешним границам слоя геля, где эти компоненты присоединяются к существующим кристаллам или начинают образовывать новые. Приблизительно 55% новообразований появляется снаружи, а 45% остается внутри первоначальной границы цементного зерна.

В процессе гидратации размеры пор в цементном камне уменьшаются, что, с одной стороны, приводит к затруднению доступа воды к еще не прореагировавшим объемам цемента и замедлению процесса гидратации, а с другой — к уменьшению размера части гидратных фаз, развивающихся в этих порах. Волокна гидросиликата кальция, образующиеся в начале гидратации, могут иметь длину 5 ... 10 нм и диаметр 0,1 ... 0,2 нм, а в конце гидратации новообразования имеют размер в 10 ... 100 раз меньше. Однако в геле полностью гидратированного цемента остаются внутренние пустоты, называемые порами геля. Размер этих пор очень мал ($15 \cdot 10^{-8}$... $40 \cdot 10^{-8}$), в них невозможно образование зародышей гидратных фаз, и поэтому они не могут зарости новообразованиями.

Пористость геля составляет 28%. Если пористость выше, то это значит, что в геле еще имеются более крупные поры, в которых могут развиваться новообразования, постепенно снижая пористость геля до 28%. Наряду с порами геля в цементном камне сохраняются более крупные капиллярные поры, образовавшиеся при приготовлении цементного теста. Однако размеры и объем пор постепенно уменьшаются. В процессе гидратации происходит постепенное перераспределение жидкой фазы: уменьшается количе-

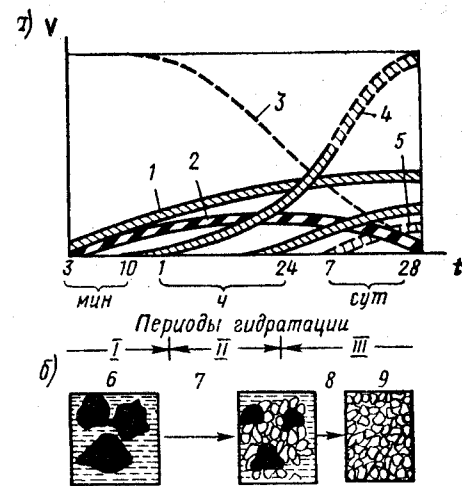


Рис. 4.2. Схемы процесса гидратации цемента (а) и структурообразования (б) цементного камня во времени:

1 — образование длинных кристаллов; 2 — этtringит; 3 — изменение пористости; 4 — образование коротких волокон; 5 — моносульфат; 6 — неустойчивая структура; 7 — формирование основной структуры; 8 — уплотнение структуры; 9 — стабильная структура

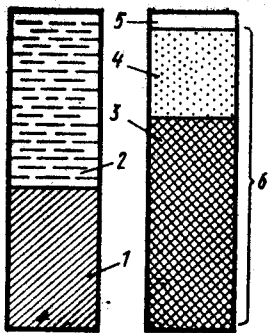


Рис. 4.3. Изменение объема твердой и жидкой фазы в системе цемент—вода при гидратации цемента (при $V/C < 0,5$): 1 — объем негидратированного цемента; 2 — первоначальный объем воды; 3 — объем твердой фазы гидратированного цемента; 4 — объем гелевой воды; 5 — объем контракционных пор; 6 — объем цементного геля вместе с порами

ство свободной, или капиллярной, воды, увеличивается количество химически и физико-химически связанной воды.

При полной гидратации цемента в химическую связь с его минералами вступает приблизительно 20 ... 25 % воды от массы цемента (это количество незначительно колеблется в зависимости от минералогического состава цемента и наличия в нем активных минеральных добавок). Так как точные химические составы для многих компонентов цемента еще не установлены, то количество химически связанной воды определяют не молекулярными расчетами, а по массе «неиспарившейся воды» при сушке по специальной методике. Соответственно используют обобщенное понятие «гидратированный цемент» и ряд усредненных показателей, характеризующих физические превращения цементного теста в процессе гидратации. Гидратированный цемент представляет собой в основном коллоидное вещество, и эта общая черта всех цементов в известной мере позволяет не

учитывать различия в химическом составе каждого из них при рассмотрении физических свойств цементного теста и камня.

Гидратация цемента сопровождается изменением относительного объема его разных фаз. В процессе гидратации вода, вступая в реакцию с цементом, приобретает регулярную структуру и общий объем системы цемент—вода уменьшается, в то время как объем твердой фазы за счет присоединения воды увеличивается (рис. 4.3). Гидратированный цемент занимает объем в 2,1 ... 2,2 раза больший, чем объем цемента до гидратации, но меньший на 0,254 от объема воды, чем суммарный объем цемента и связанной воды. Среднее значение истинной плотности продуктов гидратации (включая поры геля) в насыщенном водой состоянии приблизительно составляет 2,1 ... 2,2.

Уменьшение объема системы цемент—вода в процессе гидратации получило название контракции. Величина контракции зависит от многих факторов: состава и тонкости помола цемента, V/C , вида и содержания добавок и др. По величине контракции при прочих равных условиях можно следить за протеканием процесса гидратации цемента и структурообразования бетона. В среднем величина контракции составляет 7 ... 9 мл на 100 г цемента.

Цемент гидратирует длительное время. Степень гидратации его к определенному моменту α определяют как отношение воды, связанной к этому моменту ω_t , к количеству воды, связанной при

полной гидратации ω_{max} :

$$\alpha = \omega_t / \omega_{max}. \quad (4.1)$$

По степени гидратации судят об объемах различных структурных составляющих цементного камня и его микроструктуре в определенные сроки твердения.

Так как большинство новообразований цементного камня имеют коллоидные размеры, то в процессе гидратации поверхность твердой фазы значительно увеличивается. Удельная поверхность геля достигает величины $5,5 \cdot 10^6$ $\text{см}^2/\text{см}^3$ или около $2 \cdot 10^6$ $\text{см}^2/\text{г}$, в то время как удельная поверхность негидратированного цемента в среднем равна 3000 $\text{см}^2/\text{г}$.

На поверхности геля адсорбируется большое количество воды, отсасываемой из более крупных пор. Вода в порах геля прочно удерживается поверхностными силами и поэтому не может быть использована для гидратации еще не гидратированного цемента. Истинная плотность воды в порах геля составляет 1,1 ... 1,15. Объем воды, физико-химически связанной поверхностью геля, приблизительно равен объему химически связанной воды. По данным Т. Паузрса и С. Брунаура, общее количество химически и физико-химически связанной воды при полной гидратации цемента (в цементном геле) составляет 47 ... 52 % от массы цемента (в среднем 50 %). Поэтому если при твердении бетона не имеется доступа воды извне, то для полной гидратации цемента необходимо, чтобы V/C было больше 0,5.

Если цементный камень твердеет в воде, то полная гидратация цемента происходит и при меньших V/C , так как вода может впитываться через капиллярные и контракционные поры, частично освобождающиеся от воды в результате гидратации. Однако необходимо, чтобы объем этих пор был достаточен для размещения продуктов гидратации. Это имеет место при $V/C > 0,38$; при меньших V/C полная гидратация цемента при его твердении в воде невозможна.

Таким образом, при $V/C > 0,5$ в бетоне всегда будут присутствовать капиллярные поры, доступные для миграции влаги, и стойкость его будет понижаться. При $V/C = 0,38 \dots 0,5$ в цементном камне могут сохраниться капиллярные и контракционные поры при отсутствии притока влаги извне за счет того, что не будет полностью проходить гидратация цемента. При

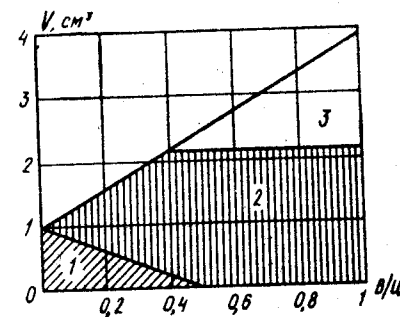


Рис. 4.4. Изменение состава цементного камня после полной гидратации цемента в зависимости от V/C : 1 — негидратированный цемент; 2 — цементный гель; 3 — капиллярная вода (поры)

водном твердении эти поры частично зарастают продуктами гидратации. При $V/C < 0,38$ в цементном камне отсутствуют капиллярные поры. Он весь состоит из цементного геля, но в нем обязательно сохраняются остатки негидратированного цемента. Эти остатки способствуют уплотнению материала и повышению его прочности.

Изменение состава цементного камня в процессе его гидратации в зависимости от V/C показано на рис. 4.4. Объем, занимаемый определенным компонентом структуры, можно определить на основе простейших расчетов. Формулы для этих расчетов приведены ниже. Используемые коэффициенты были объяснены выше.

Определение объема составных частей цементного камня в процессе гидратации ведется по следующим формулам: негидратированный цемент

$$V_{ц} = (1-\alpha)C/\rho_{ц}; \quad (4.2)$$

количество связанной воды

$$V_{св.в} = 0,25\alpha C; \quad (4.3)$$

твердые продукты гидратации

$$V_{тв.г} = \alpha [C/\rho_{ц} + 0,25C(1-0,254)]; \quad (4.4)$$

поры геля

$$V_{п.г} = 0,28V_{тв.г}; \quad (4.5)$$

объем воды в порах геля

$$V_{в.г} = 1,1V_{п.г}; \quad (4.6)$$

цементный гель вместе с порами

$$V_{ц.г} = V_{тв.г} + V_{п.г}; \quad (4.7)$$

уменьшение объема вследствие контракции

$$V_{конт} = (C/\rho_{ц} + V_{в.г} + V_{св.в}) - V_{ц.г}; \quad (4.8)$$

объем капиллярных пор

$$V_{к.п} = B - V_{св.в} - V_{п.г}. \quad (4.9)$$

Формулы могут использоваться при определении состава структуры бетона с учетом реального расхода цемента и воды, использованных для его приготовления.

Пример 4.1. Определить объемы структурных составляющих при полной гидратации 100 г цемента.

Решение. Абсолютный объем сухого цемента $100/3,15 = 31,8 \text{ см}^3$. Масса связанной воды $0,25 \cdot 100 = 25 \text{ г}$. Объем твердой фазы геля $31,8 + 0,25 \cdot 100(1 - 0,254) = 50,4 \text{ см}^3$. Объем пор геля $(0,28 \cdot 50,4) : 0,72 = 19,6 \text{ см}^3$. Объем воды в порах геля $1,1 \cdot 19,6 = 21,6$. Общее количество воды $25 + 21,6 = 46,6 \text{ г}$. $V/C = 0,47$ (по массе). Объем гидратированного цемента $50,4 + 19,6 = 70 \text{ см}^3$. Первоначальный объем цемента и воды $31,8 + 46,6 = 78,4 \text{ см}^3$. Уменьшение объема

вследствие контракции $78,4 - 70 = 8,4 \text{ см}^3$. Объем продуктов гидратации на 1 см^3 сухого цемента $2,2 \text{ см}^3$.

Пример 4.2. Определить V/C , при котором образуется плотный цементный гель (водное твердение).

Решение. На основании предыдущего примера имеем, что объем цементного геля, получаемого из 100 г цемента, равен 70 см^3 . Объем сухого цемента $31,8 \text{ см}^3$. Следовательно, объем, приходящийся на долю воды в первоначально приготовленном цементном тесте, составит $70 - 31,8 = 38,2 \text{ см}^3$, а $V/C = 0,38$ (повышение истинной плотности воды в геле не учитывается, так как оно происходит в процессе твердения).

Структура цементного камня определяет его пористость. Расчетная пористость хорошо уплотненного при изготовлении цементного камня может быть определена на основе следующих формул*: капиллярная

$$P_{кап} = (V/C - 0,5\alpha) / (V/C + 0,32); \quad (4.10)$$

контракционная

$$P_{конт} = 0,09\alpha / (V/C + 0,32); \quad (4.11)$$

геля

$$P_{г} = 0,2 / (V/C + 0,32); \quad (4.12)$$

общая

$$P_{общ} = (V/C - 0,21\alpha) / (V/C + 0,32). \quad (4.13)$$

При полной гидратации цемента пористость уменьшается при понижении V/C . При $V/C = 0,38$ относительная пористость приблизительно равна пористости цементного геля $0,28$. При меньших V/C она уменьшается за счет включения частиц негидратированного цемента. При $V/C > 0,38$ к пористости геля добавляется контракционная пористость, а при $V/C > 0,5$ еще и капиллярная пористость.

На пористость влияет также степень уплотнения цементного теста. При низких значениях V/C увеличивается флокуляция цементных частиц и объем вовлеченного воздуха. В результате возрастает общая пористость цементного камня и понижается его прочность. Используя для уплотнения цементного теста значительные давления, Абрамс получил при $V/C = 0,38$ прочность цементного камня 280 МПа . При обычном уплотнении прочность бывает значительно ниже.

При низких V/C возрастает также роль условий выдерживания. При твердении в воде увеличивается степень гидратации цемента, уменьшается пористость цементного камня, что обеспечивает повышение его прочности.

* Формулы дают ориентировочное значение пористости, так как в них использованы усредненные коэффициенты по результатам многих опытов. В действительности возможны некоторые отклонения от расчетных значений пористости.

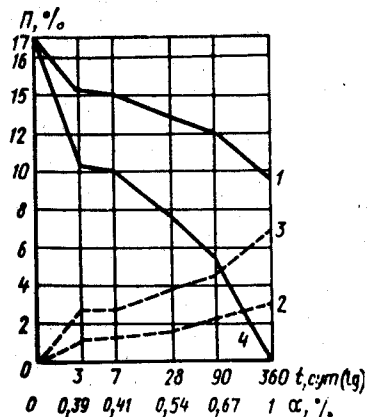


Рис. 4.5. Изменение пористости бетона в процессе твердения: 1 — общая пористость; 2 — контракционная пористость; 3 — пористость геля; 4 — капиллярная пористость

бетона во времени показано на рис. 4.5. При изменении расхода цемента и воды пористость также изменяется; ориентировочно можно считать, что для понижения капиллярной пористости на 1 % необходимо уменьшить расход воды на 10 л/м³ или на 20 ... 35 кг/м³ увеличить расход цемента. Понижение капиллярной пористости ведет к повышению прочности и стойкости бетона, поэтому на производстве стремятся готовить бетонную смесь с минимальным расходом воды, допустимым по условиям формирования конструкции или изделия.

Для практических целей часто требуется знать сроки схватывания бетонной смеси. Их определяют по изменению предельного напряжения сдвига (например, испытанием на выдергивание из бетонной смеси стержня с выступами) или по скорости прохождения ультразвука. Кривые нарастания структурной прочности или скорости ультразвука имеют два характерных участка. Первый участок, по времени совпадающий со скрытым периодом гидратации, характеризуется незначительным повышением структурной прочности. Бетонная смесь сохраняет свойства структурированной жидкости. Затем наступает третий период гидратации, бетонная смесь схватывается, что вызывает резкое увеличение структурной прочности и скорости ультразвука.

Время от начала затвердения до момента резкого возрастания прочности называется периодом формирования структуры. Его продолжительность (сроки схватывания) зависит для цементного теста от концентрации цемента, т. е. от В/Ц теста (рис. 4.6); повышение концентрации сокращает сроки схватывания. Плотность и порис-

В обычных бетонах цемент редко гидратируется полностью. При обычных сроках твердения успевает прогидратироваться только часть цемента, поэтому даже при В/Ц = 0,5 и выше в цементе сохраняются негидратировавшие зерна и значительное количество капиллярных пор.

В бетоне цементный камень в результате введения заполнителя занимает только часть объема, поэтому, хотя общий характер зависимостей сохраняется, относительные их величины меньше. Если первоначальная капиллярная пористость для цементного камня при В/Ц = 0,5 достигает 61 %, то в бетоне при расходе воды 170 л и цемента 340 кг она уменьшается до 17 %. Изменение пористости

образующейся к концу периода формирования твердой матрицы также зависят от В/Ц. Эта матрица, образованная из первичных продуктов гидратации цемента, представляет собой «первоначальный каркас», оказывающий заметное влияние на будущую структуру цементного камня.

Дальнейшее упрочнение структуры (после «узловой» точки перегиба) происходит за счет роста новообразований внутри сложившейся матрицы и соответствует третьей стадии гидратации. К концу периода формирования структуры цементное тесто превращается в камень, совершается довольно резкий переход от пластической прочности цементного теста к хрупкой прочности затвердевшего цементного камня.

В бетонной смеси на сроки схватывания существенное влияние оказывает заполнитель. Введенный в цементное тесто заполнитель вследствие проявления поверхностных сил сокращает период формирования структуры (рис. 4.7), причем чем выше содержание заполнителя и его удельная поверхность, тем больше его влияние. Это аналогично уменьшению В/Ц, поэтому для расчета условно можно принять, что свойства бетонной смеси определяются несколько меньшим В/Ц, чем В/Ц затвердения. Определить количество воды, как бы отвлекаемой заполнителем, можно путем сравнительного определения сроков схватывания цементного теста и бетонной смеси, например по результатам ультразвуковых испытаний. Для того чтобы достигнуть тех же сроков схватывания, какие имеет цементное тесто, необходимо увеличить количество воды в растворе или бетоне. Оказалось, что водопотребность песка или щебня, определенная из условия постоянства сроков схватывания, имеет те же значения, что водопотребность, определенная из условия равноподвижности бетонной смеси.

Если известны водопотребность песка и щебня, то можно определить эффективное (В/Ц), которое будет определять сроки схватывания бетонной смеси.

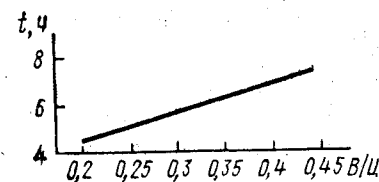


Рис. 4.6. Зависимость периода формирования структуры цементного камня (сроков схватывания) от В/Ц

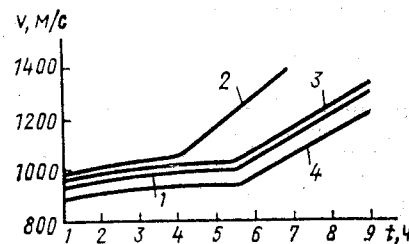


Рис. 4.7. Зависимость периода формирования структуры цементного камня, определяемого по скорости ультразвука, от состава цементного теста и раствора:

1 — цементное тесто с В/Ц = 0,3; 2 — раствор на вольском песке с В/Ц = 0,3; 3 — то же, с В/Ц = 0,38; 4 — раствор на керамзитовом песке с В/Ц = 0,7

Пример 4.3. Определить сроки схватывания бетонной смеси состава, кг/м³: цемент — 300, вода — 180, песок — 600, щебень — 1200. Водопотребность песка 7%, щебня — 2%.

Вычисляем:

$$(B/C)_н = (180 - 0,08 \cdot 600 - 0,02 \cdot 1200) / 300 = 0,38.$$

По рис. 4.7 схватывание бетонной смеси с $B/C=0,38$ наступает через 6,6 ч.

Бетонная смесь должна укладываться в дело до начала схватывания. Воздействие на нее после схватывания приводит к нарушению структуры и снижению прочности бетона.

Заполнитель оказывает заметное влияние на структурообразование бетона после затвердения бетонной смеси. Заполнитель может создавать жесткий каркас, упрочняющий структуру на первой стадии ее формирования. Наличие заполнителя существенным образом влияет и на условия твердения цементного камня. В бетоне взаимодействие цемента с водой и его твердение происходят в тонких прослойках между зернами заполнителя при постоянном взаимодействии с ним. Заполнитель повышает водоудерживающую способность цементного теста, ограничивает усадочные деформации, способствует образованию кристаллического каркаса цементного камня, влияет на изменение температуры и влажности в твердеющем цементном камне. Таким образом, заполнитель оказывает существенное влияние на формирование структуры цементного камня и бетона. Это обычно учитывается при определении свойств и проектировании состава бетона.

Для удобства расчетов и прогнозирования свойств бетона процесс формирования его структуры можно разбить на три периода: первоначальный, в течение которого бетонная смесь превращается в бетон, последующий, во время которого структура бетона постепенно упрочняется, и третий, когда структура стабилизируется и почти не изменяется со временем (рис. 4.8). Границей между первым и вторым периодами является точка А, определяющая момент, когда первоначальная структура бетона уже возникла и в дальнейшем происходит лишь ее упрочнение. В этом случае изменение прочности бетона в последующем периоде подчиняется логарифмическому закону, что позволяет более точно прогнозировать изменение свойств бетона во времени. В общем виде прочность бетона будет описываться выражением

$$R = R_0 + \Delta R, \quad (4.14)$$

где R_0 — прочность первоначальной структуры бетона; $\Delta R = f(t, T)$ — прочность бетона, приобретаемая в процессе последующего твердения и зависящая от времени и температуры твердения.

При очень слабой первоначальной структуре значением R_0 можно пренебречь. Продолжительность первоначального твердения, составляющую несколько часов, обычно не учитывают, когда определяют прочность бетона при нормальном твердении. Но при

прогнозировании прочности бетона при тепловой обработке, сроки которой соизмеримы с продолжительностью первоначального твердения, последнее необходимо учитывать в расчетах. В последующих главах приведены формулы, позволяющие определить прочность бетона в различном возрасте и при разных условиях твердения.

В процессе формирования структуры бетона и ее последующего твердения изменяется не только прочность бетона, но и другие свойства: пористость, теплопроводность, электропроводность и т. д. Процессы формирования структуры сопровождаются объемными изменениями: в зависимости от условий твердения бетон может либо увеличиваться, либо уменьшаться в объеме; последнее происходит чаще и носит название усадки. Все эти изменения более значительны на первоначальном этапе формирования структуры и особенно в период превращения псевдожидкой структуры бетонной смеси в твердую структуру бетона и постепенно затухают с возрастом бетона.

Изменения свойств бетона определяются главным образом гидратацией цемента, поэтому свойства последнего оказывают на эти закономерности решающее влияние. Процесс гидратации является ведущим, и его протекание определяет изменение структуры и свойств бетона. Другие факторы (состав бетона, свойства заполнителя и т. д.) хотя и влияют на изменение структуры и свойства бетона, но их влияние на кинетику изменения свойств бетона является вторичным и обуславливается в известной мере их воздействием на процессы гидратации цемента и структурообразование цементного камня. Постепенное затухание изменений свойств бетона во времени и их стабилизация объясняются постепенным затуханием процесса гидратации цемента.

Влияние отдельных факторов на свойства бетона в процессе изменения его структуры и при эксплуатации может изменяться.

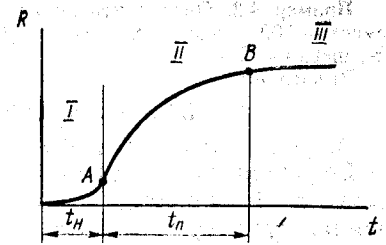


Рис. 4.8. Расчетные периоды структурообразования:

I — период образования первоначальной структуры; II — период упрочнения структуры; III — период стабилизации структуры

§ 4.2. СТРУКТУРА БЕТОНА

● Структура бетонной смеси сохраняется и при затвердевании. Поэтому структуру бетона следует классифицировать по содержанию цементного камня и его размещению в бетоне.

Однако на свойства бетона определяющее влияние оказывает его плотность или пористость. При прочих равных условиях объем и характер пористости, а также соотношение в свойствах отдель-

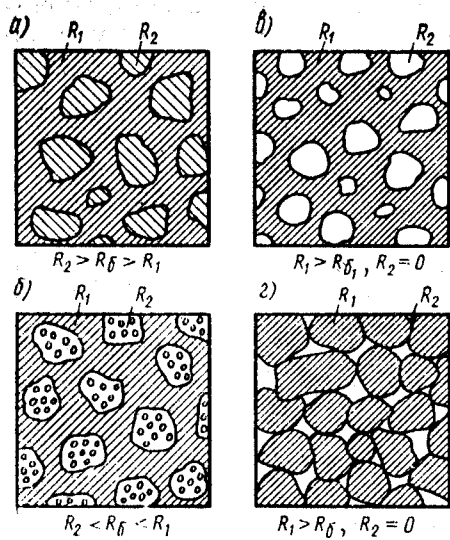


Рис. 4.9. Основные типы макроструктуры бетона:

а — плотная; б — плотная с пористым заполнителем; в — ячеистая; г — зернистая; R_0 — средняя прочность структуры; R_1 и R_2 — прочности составляющих бетона

зерна другого твердого материала (заполнителя), достаточно прочно связанные с материалом матрицы. *Ячеистая структура* отличается тем, что в сплошной среде твердого материала распределены поры различных размеров в виде отдельных условно замкнутых ячеек. *Зернистая структура* представляет собой совокупность скрепленных между собой зерен твердого материала. Пористость зернистой структуры непрерывна и аналогична пустотности сыпучего материала.

Наибольшей прочностью обладают материалы с плотной структурой, наименьшей — с зернистой. Плотные материалы менее проницаемы, чем ячеистые, а те, в свою очередь, менее проницаемы, чем материалы зернистой структуры. Последние обладают, как правило, наибольшим водопоглощением.

Большое влияние на свойства материала оказывает *размер зерен, пор или других структурных элементов*. В этой связи в бетоне различают макроструктуру и микроструктуру. Под макроструктурой понимают структуру, видимую глазом или при небольшом увеличении. В качестве структурных элементов здесь различают крупный заполнитель, песок, цементный камень, воздушные поры. Иногда для анализа и построения технологических расчетов условно принимают макроструктуру, состоящую из двух элементов:

ных составляющих бетона определяют его основные технические свойства, долговечность, стойкость в различных условиях. В этой связи целесообразно классифицировать структуру бетона с учетом ее плотности.

На рис. 4.9 показаны основные типы структур: плотная, с пористым заполнителем, ячеистая и зернистая. *Плотная структура*, в свою очередь, может иметь контактное расположение заполнителя, когда его зерна соприкасаются друг с другом через тонкую прослойку цементного камня, и «плавающее» расположение заполнителя, когда его зерна находятся на значительном удалении друг от друга. Плотная структура состоит из сплошной матрицы твердого материала (например, цементного камня), в которую вкраплены

крупного заполнителя и раствора, в котором объединяются цементный камень и песок. *Микроструктурой* называют структуру, видимую при большом увеличении под микроскопом. Для бетона большое значение имеет микроструктура цементного камня, которая состоит из непрореагировавших зерен цемента, новообразований и микропор различных размеров. По своему строению она напоминает бетон (если считать непрореагировавшие зерна заполнителем). Проф. В. Н. Юнгом подобная структура была образно названа «микробетоном».

Цементный камень является основным компонентом бетона, определяющим его свойства и долговечность. Основной составляющей микроструктуры цементного камня являются гидросиликаты кальция. Гидросиликаты кальция создают определенную пространственную структуру, которая включает непрореагировавшую часть зерен цемента с оболочкой новообразований в виде системы глобул и межзерновое пространство, заполненное в той или иной мере новообразованиями.

Гидросиликаты кальция имеют кристаллическое и полукристаллическое или аморфное строение. Кристаллические продукты, имеющие различные размеры кристаллитов, чаще появляются при тепловой, особенно автоклавной, обработке и при кристаллизации новообразований и межзерновом пространстве и порах. В цементном камне нормального твердения и в оболочке новообразований вблизи границы с исходным материалом, где возможности роста кристаллов ограничены, преобладают гелеобразные субмикрокристаллические продукты гидратации.

Состав и строение гидросиликатов зависят от отношения CaO к SiO_2 (C/S). Наиболее распространены гидросиликаты кальция тоберморитовой группы. При нормальном твердении образуются минералы типа CSH (I) и CSH (II), различающиеся по составу и степени закристаллизованности. Обозначение CSH (I) относится к гидросиликатам кальция переменного состава с соотношением $C/S=0,8 \dots 2$, обозначение CSH (II) — к гидросиликатам кальция с соотношением $C/S=1 \dots 1,5$.

Кристаллические минералы группы тоберморита имеют несколько разновидностей, различающихся межплоскостным расстоянием и количеством межслоевой воды. Тоберморит $C_5S_6H_5$ с расстоянием 11,3 А называют «нормальным»; если в нем кремний замещен алюминием, то его называют Al-замещенным. Тоберморит чаще образуется при повышенных температурах. В материалах автоклавного твердения распространен минерал ксонолит C_3S_3H , а также минералы типа γ -гидрата C_2S ($C_2SH_{0,3-1}$), трехкальциевого гидросиликата C_3SH_2 и др.

Полукристаллические и аморфные формы гидросиликата кальция обозначают $C-S-H$, подразумеваемая неопределенность состава. Кристаллы гидроксида кальция (минерал портландит) выделяются в поровом пространстве между клинкерными зернами, на

поверхности воздушных пор, в системе гидросиликатного геля, иногда срастаясь с кристаллами других минералов. Кристаллы различной формы образуют гидроалюминаты кальция и гидросульфалюминаты (минерал эттрингит и др.).

Продукты гидратации алита — основного минерала цементного камня — образуют, по современному воззрению, две оболочки: «внешнюю» — кристаллическую и «внутреннюю» — аморфную. Внешняя оболочка складывается из кристаллов различных минералов в зависимости от условий твердения и других факторов и может содержать материалы с менее оформленной структурой, особенно если поровое пространство ограничено. Внутренняя оболочка содержит слабозакристаллизованные продукты гидратации переменного состава, по соотношению C/S приближающиеся к исходному материалу. Граница между остаточным зерном C_3S и внутренней оболочкой четкая, а граница между внутренней и внешней оболочкой расплывается. В этой зоне могут возникать микротрещины от усадки, нагревания и других видов воздействий.

Цементный камень содержит участки с различной структурой, сложенные разными минералами. Его строение отличается сложностью, многообразием и неоднородностью. Неоднородность строения обусловлена тем, что цементный камень состоит из глобул цементных зерен с постепенно убывающей к их поверхности плотностью, контактной зоны между глобулами, состоящей из различных новообразований, а также включает поры, неплотности и дефекты структуры. Необходимо учитывать и химическую неоднородность камня, т. е. то, что отдельные участки состоят из отличающихся друг от друга минералов и в некоторых местах возможно значительное увеличение содержания отдельных компонентов по сравнению с их средним значением, определяемым физико-химическим анализом. Микроструктура и неоднородность цементного камня существенно влияют на его прочность и другие свойства.

Свойства цементного камня зависят от его минералогического состава. Изменяя минералогический состав вяжущего и условия твердения, можно получать различные типы микроструктуры цементного камня: ячеистую, зернистую, волокнистую, сотовую или сложные структуры, состоящие из сочетания разных типов структуры. В технологии бетона используются различные вяжущие вещества, применяются разнообразные условия твердения бетона, что обуславливает различные типы микроструктуры цементного камня.

Вблизи зерен заполнителя в результате влияния его поверхностных сил и ряда других причин микроструктура цементного камня может несколько измениться по сравнению со структурой основной массы, поэтому часто рассматривают особо микроструктуру и свойства контактной зоны между цементным камнем и заполнителем, выделяя ее в виде отдельного структурного элемента.

Определенное влияние на свойства бетона оказывает также микроструктура заполнителя. На рис. 4.10 приведены данные опытов, показывающие изменение свойств материала в контактной зоне. Рассмотренная выше классификация структур применима как к макроструктуре, так и микроструктуре бетона, а данные опытов подтверждают, что при рассмотрении бетонов особое внимание надо обращать на контактную зону цементного камня и заполнителя.

Структура бетона, как правило, изотропна, т. е. ее свойства по разным направлениям (приблизительно) одинаковы. Однако путем особых приемов формования или введения специальных структурообразующих элементов структуре бетона может быть придана анизотропность, т. е. ее свойства в одном направлении будут заметно отличаться от свойств в другом направлении. Примером может служить бетон на заполнителе с лещадными зернами, ориентированными в определенном направлении (рис. 4.11).

Для различных видов бетона характерна своя структура. Для тяжелых бетонов характерна плотная структура, для легких конструктивных — плотная структура с пористыми включениями, ячеистые бетоны имеют ячеистую структуру, крупнопористые — зернистую. Подразделение на приведенные типы структур условно, в действительности структура бетона отличается большей сложностью, например в плотной структуре тяжелого бетона цементный камень имеет значительное количество пор, в плотной структуре

легкого бетона поры наблюдаются не только у заполнителя, но и в цементном камне, отдельные ячейки в ячеистой структуре могут соединяться между собой капиллярами и т. д. Однако представление о различных типах структур позволяет более четко проектировать состав бетона, используя характерные для каждого случая зависимости.

Бетоны являются искусственными каменными материалами. Известно, что прочность подобных материалов зависит от их плотности, так как она определяет плотность упаковки струк-

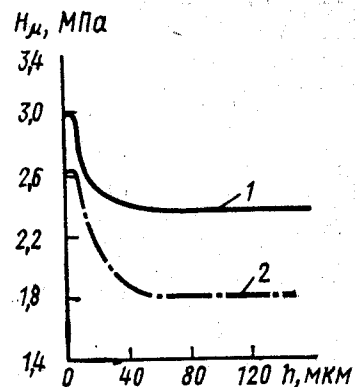


Рис. 4.10. Изменение микротвердости H цементного камня в контактной зоне у поверхности заполнителя:
1 — гранит; 2 — кварц

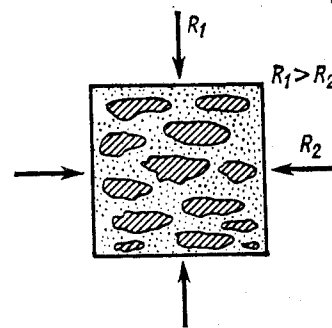


Рис. 4.11. Прочность бетона с лещадным заполнителем

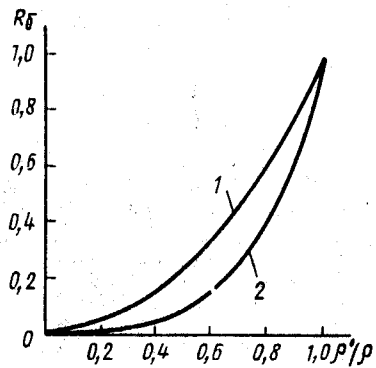


Рис. 4.12. Зависимость прочности бетона R_b от относительной плотности ρ'/ρ :
1 — ячеистой структуры; 2 — зернистой структуры

Если принять, что $R_1/\rho_1^n = A$ есть характеристика данного материала, численно равная его прочности при плотности, равной 1, то выражение (4.2) можно записать в виде

$$R = A\rho^n. \quad (4.16)$$

Выражение (4.15) показывает, что прочность пористого материала (а бетоны являются материалами с различной степенью пористости) пропорциональна его плотности. Показатель степени n для материалов разной структуры может колебаться от 2 до 6. Для материалов ячеистой структуры его ориентировочно можно принять равным 2. Для материалов зернистой структуры показатель степени n зависит от формы зерен составляющих материалов и прочности их контактов. В среднем его можно принять равным 4 (при колебаниях от 3 до 6).

Зависимость прочности бетонов от его структуры показана на рис. 4.12. При одинаковой относительной плотности прочность материала зернистой структуры значительно ниже, чем ячеистой. Поэтому наряду с величиной пористости материалов для окончательного суждения о прочности и других свойствах бетона необходимо знать характер пористости, определяемый его структурой.

Структура бетона неоднородна. Отдельные объемы материала могут значительно отличаться по своим свойствам, что оказывает заметное влияние на суммарные свойства материала. Могут различаться по свойствам не только цементный камень и заполнитель, но и отдельные зерна заполнителя друг от друга и отдельные микрообъемы цементного камня. Выше приводился пример изменения свойств цементного камня в контактной зоне. Сама контактная зона, как основной массив цементного камня, неоднородна, в ней

турных элементов, объем и характер дефектов (пор, микротрещин и др.). Значения величины физической связи между молекулами у бетонов на различных материалах близки между собой, и прочность в основном обуславливается плотностью бетона и характером его структуры.

В общем виде зависимость прочности бетона от его плотности может быть представлена выражением

$$R = R_1(\rho/\rho_1)^n, \quad (4.15)$$

где R_1 — прочность материала при плотности ρ_1 ; n — показатель степени, зависящий от структуры материала.

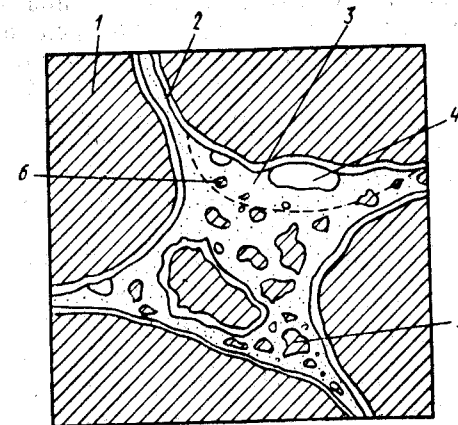


Рис. 4.13. Элементарная ячейка структуры бетона:

1 — зерна заполнителя; 2 — контактная зона; 3 — зона ослабленной структуры вследствие седиментации; 4 — воздушные пузырьки; 5 — зона уплотнений структуры; 6 — крупные седиментационные поры

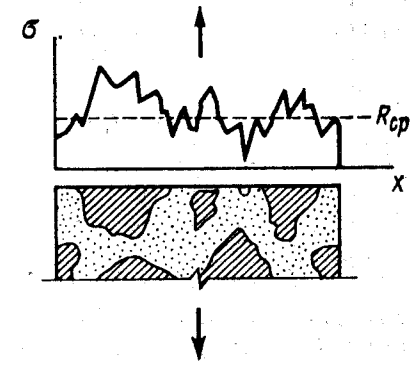


Рис. 4.14. Неоднородность структуры и прочности бетона по сечению образца или изделия

содержатся более или менее дефектные места, непрореагировавшие зерна, микротрещины и другие элементы, снижающие однородность материала.

На рис. 4.13 показана элементарная ячейка бетона. Наглядно видна неоднородность структуры, включающей плотный и прочный материал с разными свойствами, переходные зоны, пустоты. Неоднородность структуры обуславливает неоднородность прочности бетона по объему. На рис. 4.14 показано возможное изменение прочности бетона по сечению, подтверждающее высказанное положение. Кроме того, структура и свойства бетона могут колебаться в незначительных пределах в разных изделиях и образцах, даже изготовленных из одного и того же состава.

Неоднородность структуры и свойств требует применения к оценке бетона вероятностно-статистических методов и должна учитываться при проектировании и организации производства бетонных и железобетонных конструкций.

ГЛАВА 5 ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

§ 5.1. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ БЕТОНА ПОД НАГРУЗКОЙ

Качество бетона и его работа в конструкциях и сооружениях определяются его свойствами. Важнейшее свойство материала — прочность.

● **Под прочностью** понимают способность сопротивляться разрушению от действия внутренних напряжений, возникающих в результате нагрузки или других факторов. Материалы в сооружениях могут испытывать различные внутренние напряжения: сжатие, растяжение, изгиб, срез и кручение. Бетон относится к материалам, которые хорошо сопротивляются сжатию, значительно хуже — срезу и еще хуже — растяжению (в 5 ... 50 раз хуже, чем сжатию). Поэтому строительные конструкции обычно проектируют таким образом, чтобы бетон в них воспринимал сжимающие нагрузки. При необходимости восприятия растягивающих усилий конструкции армируют. В железобетонных конструкциях напряжения растяжения и среза воспринимаются стальной арматурой, обладающей высоким сопротивлением этим видам нагрузки. Поэтому одной из важнейших характеристик бетона является его прочность при сжатии. Однако имеются отдельные типы конструкций (дорожные покрытия, полы и др.), в которых бетон должен воспринимать напряжения растяжения при изгибе. В этом случае при проектировании состава бетона исходят из необходимости получения заданной прочности бетона при изгибе или растяжении.

Разрушение в физическом понимании состоит в отделении частей тела друг от друга. Дефекты в материале приводят к облегчению процесса разрушения, т. е. понижают прочность материала.

Особенностью поведения бетона под нагрузкой хрупких материалов, а следовательно, и бетона является то, что при сжатии они разрушаются от растягивающих напряжений, возникающих в направлениях, перпендикулярных действию сжимающей нагрузки, или от напряжений среза, действующих по определенным плоскостям.

Прочность бетона является интегральной характеристикой, которая зависит от свойств компонентов бетона, его состава, условий приготовления, твердения, эксплуатации и испытания. В свою очередь, с прочностью бетона связан и ряд других его свойств.

Для правильного проектирования бетонных и железобетонных конструкций, организации их производства, назначения требований к бетону и контроля его качества необходимо представлять особенности поведения бетона под нагрузкой, роль методики испытаний и структуры бетона при определении его прочности.

Поведение бетона под нагрузкой не только определяет его прочность — итоговый результат испытания, но существенно важно для определения надежности работы материала в условиях эксплуатации для оценки его долговечности, трещиностойкости и других свойств бетона.

На основе многочисленных опытов было установлено, что при разрушении бетона наблюдаются два вида разрушения поверхности (рис. 5.1). В первом случае, когда прочность заполнителя при растяжении выше прочности раствора или цементного камня, разрушение происходит по раствору и в обход зерен заполнителя. Во втором случае, когда прочность заполнителя ниже прочности раст-

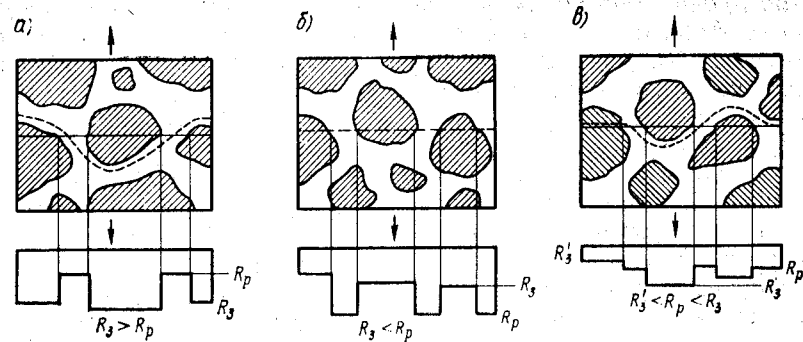


Рис. 5.1. Характер разрушения бетона:
а — по цементному раствору без разрушения заполнителя; б — с разрывом зерен заполнителя; в — смешанное разрушение

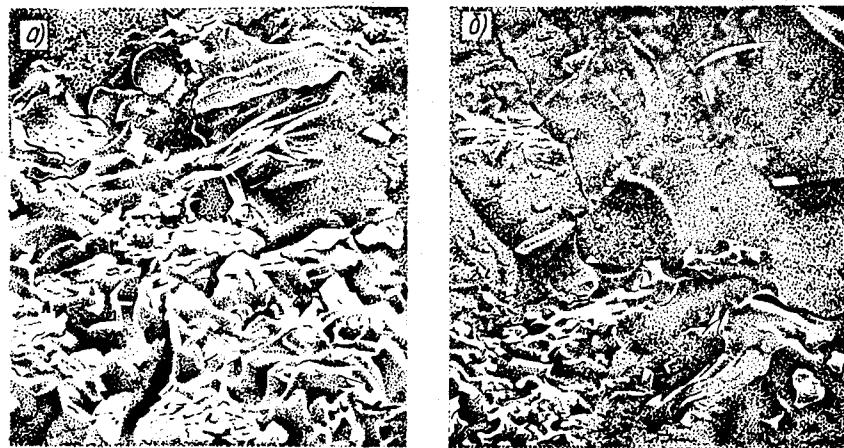


Рис. 5.2. Микротрещины в структуре бетона:
а — в цементном камне ($\times 2200$); б — на границе цементного камня и заполнителя ($\times 2500$)

вора, разрушение происходит по раствору и по зернам заполнителя. Может быть и смешанный характер разрушения, когда прочность зерен заполнителя и прочность раствора близки между собой и в разных участках структуры более прочным оказывается либо заполнитель, либо раствор.

Микроскопические и ультразвуковые методы исследований, получившие развитие в последнее время, показали, что задолго до разрушения бетона в нем образуются микротрещины разрыва (рис. 5.2), возникающие из-за неоднородности структуры бетона.

По взаимному расположению раствора и крупного заполнителя

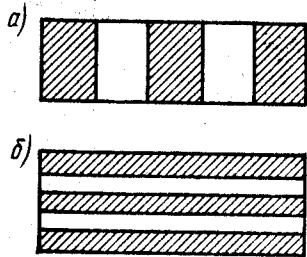


Рис. 5.3. Возможные элементарные схемы макроструктуры бетона:

а — последовательно составленная;
б — параллельно составленная

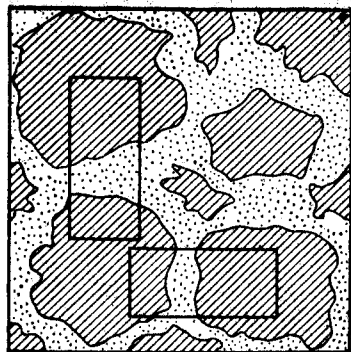


Рис. 5.4. Действительная макроструктура бетона

можно представить две различные схемы макроструктуры бетона: последовательно и параллельно составленные (рис. 5.3). Соответственно можно различить два простейших неоднородных напряженных состояния в бетоне: 1) напряжения в составляющих структуры равны, а деформации обратно пропорциональны их модулям деформации; 2) деформации в составляющих структуры равны, а напряжения прямо пропорциональны их модулям деформации. Прочность материала в первом случае определяется прочностью более слабого элемента или сцепления между составляющими, во втором — прочностью элемента, у которого меньше предельная деформация. Качество бетона И. М. Грушко предлагает характеризовать отношением его прочности R_6 к прочности наиболее слабого элемента R_1 , доказывая, что

$$A = R_6 / R_1 = f(R_{ц} / R_p; R_1 / R_2; E_1 / E_2; F_1 / F_2). \quad (5.1)$$

Анализ показывает, что, поскольку действительная структура бетона имеет сложное строение (рис. 5.4), коэффициент структуры A может изменяться в пределах

$$\frac{F_p}{F_{6k}} = A_{\min} \leq A \leq A_{\max} = f(R_{ц} / R_p; F_6 / F_p; k), \quad (5.2)$$

где k — коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений и прочие факторы.

При A_{\min} или A_{\max} прочность бетона незначительно зависит от свойств заполнителя. Она определяется в основном прочностью раствора, но при других значениях A крупный заполнитель оказывает значительное влияние на прочность бетона. На рис. 5.5 приведены кривые $R_6 = f(R_p)$, полученные теоретически и подтверждаемые опытами.

Анализу причин разрушения бетона и теоретическим основам его прочности посвящены работы А. А. Гвоздева, О. Я. Берга, Б. Г. Скрамтеева, А. Е. Шейкина, П. А. Ребиндера, А. В. Саталкина, Ю. Е. Корниловича, Фрейсине, Лермита, Рюша, Пауэрса и других исследователей.

■ Если обобщить результаты и выводы ряда исследователей, то современные представления о структуре и процессе разрушения бетона можно свести к нескольким основным положениям:

1. Прочность и деформативность бетона определяются главным образом структурой и свойствами цементного камня, который скрепляет зерна заполнителя в монолит. Структура и свойства цементного камня зависят от его минералогического состава, водоцементного отношения, тонкости помола цемента, возраста, условий приготовления и твердения, введенных добавок. В последнее время было показано, что путем применения тех или иных технологических приемов, например активацией цементного теста или введением добавок, можно значительно изменить прочность и деформативность бетона. В отдельных случаях свойства бетона изменялись в 1,5 ... 2 раза. Свойства бетона существенно зависят от вида и качества заполнителя, а также от его состава. Прочности бетонов, приготовленных на цементе одинакового качества, при постоянном водоцементном отношении, но на разных заполнителях, могут отличаться в 1,5 ... 2 раза.

2. Разрушение бетона происходит постепенно. Вначале возникают перенапряжения, а затем микротрещины в отдельных микрообъемах. Развитие этого процесса сопровождается перераспределением напряжений и вовлечением в трещинообразование все большего объема материала, вплоть до образования сплошного разрыва того или иного вида, зависящего от формы образца или конструкций, ее размеров и других факторов. На последней стадии нагружения процесс микроразрушений становится неустойчивым и носит лавинный характер.

3. Разрушение бетона при сжатии обусловлено развитием микротрещин отрыва, направленным параллельно действующему усилию. Происходит кажущееся увеличение объема образца, но в действительности нарушается сплошность материала. Процесс развития микротрещин определяется структурой бетона, в частно-

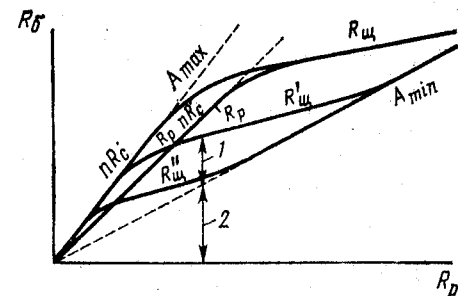


Рис. 5.5. Зависимость прочности бетона от прочности раствора и заполнителя:
1 — усилие, воспринимаемое щебнем; 2 — то же, раствором

сти размером и числом дефектных мест в ней, а также видом и режимом приложенной нагрузки.

4. Большое влияние на процесс разрушения оказывает жидкая фаза в бетоне. Облегчая развитие пластических деформаций, деформаций ползучести и микротрещин, ослабляя структурные связи в бетоне, вода снижает его прочность. Степень влияния этого фактора зависит от скорости приложения нагрузки.

Вполне понятно, что процесс разрушения бетона в действительности сложнее и зависит от большего количества факторов, чем указано выше. До настоящего времени некоторые положения в этой области являются спорными или требуют уточнения.

Теория прочности должна учитывать не только структуру материала, но и статистические закономерности, так как разрушение бетона есть интегральное явление и конечный результат может изменяться в зависимости от сочетания дефектов структуры, погрешностей испытания и других факторов, а вероятность тех или иных возможных сочетаний управляется законами статистики. Таким образом, поведение бетона при нагружении обуславливается рядом структурных и статистических факторов.

Бетон представляет собой искусственный конгломерат, в котором отдельные зерна заполнителя скреплены в монолит цементным камнем. В качестве отдельного структурного элемента можно также выделить контактную зону между заполнителем и цементным камнем толщиной 20 ... 40 мкм, в которой наблюдается изменение свойств цементного камня, а в ряде случаев и заполнителя. На поверхности, в порах и капиллярах твердой фазы находится жидкая фаза, количество и состав которой зависят от состава бетона и примененных материалов, условий твердения и других факторов.

При нагружении бетона вследствие различия физико-механических свойств и размеров компонентов и наличия дефектов в нем появляется вторичное поле напряжений. Наибольшая концентрация напряжений создается на границах дефектов и компонентов с разными свойствами, т. е. преимущественно в контактной зоне.

Напряжения вызывают упругую и пластическую деформации. Упругая деформация обуславливается изменением межатомных расстояний и может происходить мгновенно, т. е. абсолютно упругое тело не меняет своих свойств в зависимости от времени нагружения.

Реальные тела имеют большое количество точечных и линейных несовершенств кристаллической решетки (вакансии и дислокации), а также и более крупные дефекты. Движение дислокаций обуславливает пластическую деформацию. Перемещение дислокаций зависит от вида и режима нагрузки.

Теория дислокаций разработана применительно к кристаллическим телам. В бетоне кристаллические компоненты составляют основную массу твердой фазы, так как, по современным понятиям,

даже гель состоит из субмикроскопических кристаллических образований. Движение дислокаций наиболее интенсивно происходит в местах концентрации напряжений, где наблюдается скопление вакансий и дислокаций, приводящее к образованию микрообъемов материала с разрыхленной структурой. С повышением напряжения или увеличением времени его действия здесь могут возникнуть микротрещины, в свою очередь вызывающие концентрацию напряжений и дальнейшее интенсивное движение дислокаций, т. е. как бы генерирующие процессы разрушения. Таким образом, движение дислокаций создает предпосылки к образованию микротрещин.

С другой стороны, движение дислокаций, вызывая пластические сдвиги, способствует перераспределению напряжений и снижению их концентрации и тем самым частично предотвращает образование или развитие микротрещин. Микротрещины в первую очередь появляются в наиболее слабых местах. При соответствующих условиях (повышении нагрузки, расположении трещины параллельно действующему сжимающему усилию, сохранении концентрации напряжений и т. д.) микротрещины увеличиваются, соединяются между собой и с ранее существовавшими и превращаются в трещины больших размеров.

Каждому напряжению соответствует свой уровень развития процесса движения дислокаций и образования разрыхленных мест и микротрещин. Чем выше напряжение, тем больше дефектных мест и больше вероятность разрушения материала. Когда количество дефектов, существовавших до нагружения и вновь образовавшихся, станет достаточным для образования сплошной трещины (или трещин) отрыва, бетон разрушается.

Автором совместно с А. Ф. Щуровым и В. Н. Мамаевским было проведено изучение процесса разрушения цементного камня и бетона с привлечением электронного сканирующего микроскопа и малоугловой рентгенографии, которые позволили определить параметры дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня и характер микроразрушений. Одновременно определялась энергия разрушения бетона. Применение химических добавок и различных режимов твердения позволило в заметных пределах изменять размеры кристаллитов и пор в цементном камне и его энергию разрушения.

Анализ электронных фрактограмм цементного камня бетонных призм, нагруженных выше точки R_0^T и полностью разрушенных, подтвердил, что процесс макро- и микроразрушения бетона и цементного камня носит кинетический характер и начинается с зарождения и развития микротрещин скола в кристаллитах гидросиликатов, которые расположены вблизи концентраторов напряжений (пор и других технологических дефектов, рис. 5.6). Возможны два механизма возникновения ступенек скола; они образуются либо в результате скола по плоскостям спайности при переходе трещин в кристаллит с другой ориентацией, либо в результате пластичес-



Рис. 5.6. Микроструктура цементного камня, на поверхности которого видны типичные ступеньки скола ($\times 2200$)

казали, что в цементном камне возникшие трещины скола останавливаются границами кристаллитов, особенно в тех местах, где ориентация плоскостей спайности при переходе в соседний кристаллит скачкообразно изменяется. Для распространения трещины от одного зерна к другому до окончательного макроскопического разрушения необходимо, чтобы упругой энергии, которая освобождается при распространении трещины, было достаточно не только для образования новых поверхностей магистральной трещины, но также и для компенсации всей дополнительной работы, идущей на производство пластических деформаций и образование ступенчатых поверхностей скола. Если пластическая деформация ограничивается тонким слоем на поверхности макротрещины (именно так и обстоит дело в цементном камне), то работу локальных пластических деформаций на единицу поверхности $\Delta\gamma$ можно рассматривать как дополнительную энергию, которая должна быть прибавлена к поверхностной энергии в уравнении Гриффитса—Орована, являющемся условием распространения трещины в поликристаллических материалах:

$$\sigma = \sqrt{E\gamma_1/d_{cp}} = kd_{cp}^{-1/2}, \quad (5.3)$$

где σ — некоторое кристаллическое напряжение; E — модуль упругости; $\gamma_1 = \gamma + \Delta\gamma$ — эффективная поверхностная энергия разрушения; d_{cp} — средний размер кристаллита; $k = (E\gamma_1)^{1/2}$ — коэффициент вязкости разрушения.

Эта формула справедлива и для пористых тел при введении в нее коэффициентов, учитывающих пористость и другие дефекты.

ких сдвигов по плоскостям легкого скольжения, которые содержат молекулы подвижной воды. Оба эти механизма приводят к тому, что величина эффективной энергии разрушения, которая в конечном итоге определяет прочность и трещиностойкость материала, становится функцией не только общей пористости и степени гидратации, но и характеристик дисперсно-кристаллитной структуры.

Наблюдения поверхностей разрушения с помощью растрового электронного микроскопа по-

казали возможность применения соотношений указанного типа к цементному камню, а следовательно, и физических моделей разрушения, лежащих в основе этих формул, была проведена экспериментально. С этой целью были построены зависимости прочности — среднего размер d_{cp} кристаллита геля гидросиликатов (рис. 5.7) и вычислена эффективная энергия разрушения через экспериментально наблюдаемую величину k_2 (табл. 5.1). Сте-

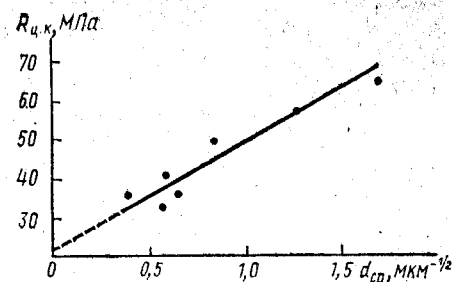


Рис. 5.7. Зависимость прочности цементного камня $R_{ц.к.}$ от среднего размера кристаллитов d_{cp}

пень гидратации и общая пористость этих образцов оставались постоянными. Из рассмотрения этих данных следует, что, во-первых, прочность цементного камня зависит от размера кристаллита по закону $R = f(d_{cp})^{-1/2}$; во-вторых, не только степень гидратации и общая пористость определяют прочность цементного камня, при одинаковых значениях этих характеристик прочность может значительно изменяться вследствие различия дисперсно-кристаллитной структуры геля гидросиликатов; в-третьих, эффективная энергия разрушения γ_1 оказалась значительно больше, чем поверхностная энергия γ , вычисленная из кристаллохимических данных и измеренная адсорбционными методами.

С помощью модели распространения трещины раскрыта физическая природа связи между характеристиками структуры, прочностью и трещиностойкостью, наблюдаемая при изменении условий твердения и введении химических добавок. Модифицирующее действие комплексных добавок состоит в улучшении микропластических свойств кристаллитной структуры, уменьшении размеров зерен и пор цементного геля, а также более равномерном их распределении в микрообъемах.

Таблица 5.1. Эффективная энергия разрушения цементного камня

Цементный камень	В/Ц	Эффективная энергия разрушения, Дж/м ²
Без добавки	0,3	2,8
	0,35	2,1
С добавкой НК	0,3	3,7
	0,35	3,2
С добавкой КД	0,3	4,4
	0,35	3,6

Способность структуры к микропластическим деформациям повышает эффективную энергию разрушения, а малые размеры кристаллитов приводят к увеличению микрообъемов, в которых эта деформация развивается. Таким образом, повышаются вязкость разрушения, трещиностойкость и прочность материала в целом.

Эксперименты по измерению вязкости разрушения показали, что низкая прочность цементного камня обусловлена в первую очередь наличием в нем неравномерного распределения продуктов гидратации. Создание мелкозернистой равномерной структуры из слоистых кристаллитов, способных к микропластическим деформациям без технологических дефектов, что достигается с помощью химических добавок, можно рассматривать как эффективный путь повышения прочности и трещиностойкости бетонов.

Процесс движения дислокаций, образования и развития микротрещин и передислокации жидкой фазы связан с переходом отдельных атомов, молекул и блоков на новые места и поэтому зависит от времени действия нагрузки. Чем короче время действия нагрузки или выше скорость нагружения, тем с меньшей относительной полнотой протекает этот процесс, меньший объем материала им охватывается и меньше вероятность появления микротрещин и трещин отрыва. Внешне это выражается в уменьшении относительной деформации бетона, соответствующей определенному напряжению (за счет уменьшения пластической деформации), или «запаздывании деформаций».

Для разрушения бетона, т. е. образования сплошной трещины отрыва, требуется достаточное развитие процесса микротрещинообразования и достижение определенной предельной деформации. Чем короче время нагружения, тем большее напряжение необходимо приложить для образования трещины отрыва и разрушения материала. Таким образом, предел прочности бетона зависит от времени или скорости приложения нагрузки.

Большое значение для прочности бетона имеет сцепление цементного камня с заполнителем, т. е. прочность контактной зоны. В последней из-за недостаточного сцепления, седиментационных процессов и других причин количество дефектов (пор различных размеров, микротрещин и др.) больше, чем в остальном объеме бетона, и, кроме того, свойства контактирующих слоев материала резко меняются. Поэтому в этой зоне при нагружении происходят интенсивное движение дислокаций, разрыхление материала и образование микротрещин. Разрушение бетона начинается с контактного слоя, поэтому ухудшение его свойств (например, после замораживания и оттаивания) резко повышает вероятность разрыва по дефектным местам и снижает прочность бетона.

Большое влияние на прочность может оказать влажность бетона. При медленном нагружении жидкая фаза, передвигаясь по капиллярам и проникая в устья микротрещин, облегчает деформирование бетона, развитие трещинообразования и разрушение. С по-

вышением скорости нагружения, с одной стороны, передислокация жидкой фазы начинает отставать от скорости трещинообразования, а с другой стороны, повышается сопротивление жидкой фазы нагрузке в соответствии с известной зависимостью для вязких тел

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\eta} \sigma,$$

т. е. жидкая фаза не только передает давление от нагрузки на стенки пор и капилляров, но и частично воспринимает его сама, как бы разгружая твердую фазу.

При высокой скорости нагружения жидкая фаза практически не успевает попасть в устье вновь образующихся микротрещин и повлиять на процесс их развития (обычно это наблюдается при времени нагружения до разрушения меньше 0,2 ... 0,3 с).

С повышением скорости нагружения уменьшается отрицательное действие жидкой фазы и прочность бетона повышается. Степень этого повышения определяется не только скоростью нагружения, но и содержанием жидкой фазы в бетоне. Чем выше степень водонасыщения, тем больше жидкая фаза влияет на свойства бетона (рис. 5.8). При быстром нагружении водонасыщенный бетон оказывается прочнее сухого.

При большой длительности нагружения бетона в раннем возрасте цемент способен вступать в химическое взаимодействие с водой в процессе испытания. Происходит так называемое самозалечивание микротрещин и постепенное упрочнение структуры. При быстром нагружении (менее 1 с) химические взаимодействия между цементом и водой можно не учитывать, тем более что вследствие высказанных выше причин в ряде случаев вода не успевает поступить к вновь образующимся свободным поверхностям, способным к реакции.

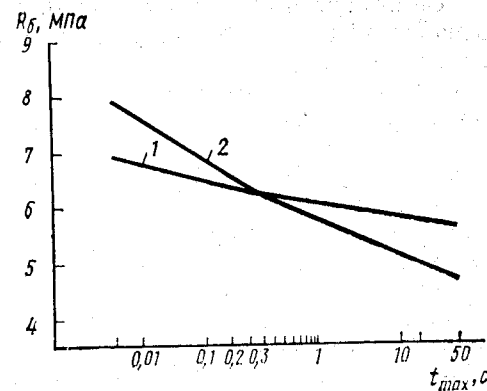


Рис. 5.8. Влияние времени t_{max} нагружения до разрушения на прочность R_6 сухого 1 и водонасыщенного 2 бетона ($\times 10$)

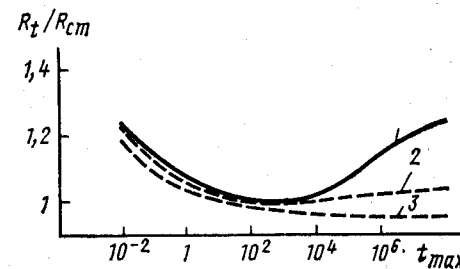


Рис. 5.9. Обобщенная зависимость $R_t/R_{ct} = f(t_{max})$ для бетона: 1 — в раннем возрасте; 2 — в возрасте одного месяца; 3 — в возрасте более года

В общем виде в этом случае зависимость $R_d/R_{ст} = f(t)$ имеет S-образное очертание (рис. 5.9), где левая ветвь характеризует упрочнение бетона при высокой скорости нагружения, а правая — при очень медленном нагружении или при длительной выдержке под нагрузкой вследствие протекания процесса твердения бетона.

§ 5.2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

На результаты определения прочности бетона влияет много факторов. Даже образцы из одного и того же замеса, твердевшие в одинаковых условиях и испытанные на одном прессе, показывают различные значения прочности бетона. Если же имеются отклонения в методике испытаний, то различия в прочности могут быть весьма значительными. Следует помнить, что определяемый испытаниями показатель прочности бетона является характеристикой, которая зависит не только от свойств материала, но в некоторой степени от методики испытаний. Поэтому необходимо строго придерживаться соответствующих рекомендаций по методикам испытания и добиваться максимального единообразия в их проведении.

Для пояснения сказанного рассмотрим влияние различных факторов, связанных с подготовкой и испытанием образцов на прочность бетона при сжатии. Условно эти факторы можно разделить на три группы: статистические, технологические, методические.

Уже указывалось, что невозможно получить совершенно одинаковые по структуре образцы бетона. Всегда будет наблюдаться пусть незначительное, но различие в распределении отдельных компонентов бетона, в возникающей системе дефектов (пор, микротрещин и т. д.), в колебаниях свойств отдельных зерен составляющих (цемента и заполнителей) и новообразований цементного камня. В результате появляется определенная неоднородность материала, которая сказывается на результатах испытаний. Более подробно этот вопрос рассматривается далее в § 5.7.

Факторы, связанные с приготовлением образцов и их качеством, относятся к технологическим. На результаты испытаний будут влиять параллельность граней образца, их ровность и шероховатость, условия изготовления. Так, при изготовлении бетонных образцов из пластичных смесей при больших расходах воды и в ряде других случаев под зернами заполнителя вследствие седиментации возникают ослабленные места, которые имеют горизонтальное направление. При испытании в этом случае заметное влияние на результаты будет оказывать расположение образца между плитами пресса. Наименьшие результаты получаются при сжатии образцов, положенных на бок, т. е. когда ослабленные полости совпадают с направлением усилия сжатия. В этом случае наличие слабых мест заметно уменьшает сопротивление образца действию растягивающих усилий в горизонтальном направлении и способствует

разрушению его. Прочность образцов, испытанных в положении на боку, может быть на 10...20% ниже, чем при испытании в том положении, в котором образец формовался. Поэтому при испытаниях обязательно следует учитывать указанные факторы и располагать образцы на прессе в одинаковом положении. Кубы обычно испытывают в положении на боку, чтобы иметь запас прочности.

К методическим факторам относятся различные аспекты методики испытания, каждый из которых оказывает определенное влияние на его результат. Конструкция и особенности пресса, размеры образца, условие взаимодействия образца и пресса, скорость нагружения, влажность бетона — все эти факторы могут оказать существенное влияние на окончательный результат — предел прочности бетона.

При испытании бетонного образца в прессе напряжения возникают не только в образце, но и в плитах пресса. Так как модуль упругости стали намного выше модуля упругости бетона, то даже при одинаковых напряжениях деформации, возникающие в плитах пресса, в том числе поперечные деформации от действия растягивающих напряжений, оказываются меньше, чем деформации бетона. Между плитами пресса и образцом обычно действуют силы трения, в результате чего поверхность бетонного образца, прилегающая к плитам пресса, имеет одинаковые с последними деформации. Эти деформации значительно меньше деформаций в других сечениях. Образец же разрушается тогда, когда деформации достигают предельных значений, при которых возникают сплошные трещины. Действие плит пресса, уменьшая деформации слоев бетона, прилегающих к ним, как бы оказывает на них поддерживающее влияние и предохраняет от разрушения. Это явление принято называть эффектом обоймы. Поэтому кубы бетона имеют обычно характерную форму разрушения (рис. 5.10,а), когда наибольшие деформации и разрушения наблюдаются в среднем сечении образца, а образец после испытания как бы представляет две сложенные вершинами усеченные пирамиды.

Однако можно изменить условия взаимодействия пресса и образца и тем самым изменить напряженное состояние, возникающее в образце, и результаты испытания. Например, если с помощью какой-либо смазки ликвидировать силы трения между плитами пресса и образцом, то меняется характер разрушения (рис. 5.10,б), образец как бы раскалывается системой параллельных вертикальных трещин и вследствие отсутствия поддерживающего влияния эффекта обоймы прочность его снижается на 20...30%. Однако подобные испытания не применяют, так как устранить полностью трение трудно и обычно смазка лишь снижает коэффициент трения до некоторого значения, которое зависит от вида смазки, прочности и структуры бетона и ряда других факторов. Смазка вносит неопределенность в условия испытания, увеличивает разброс ре-

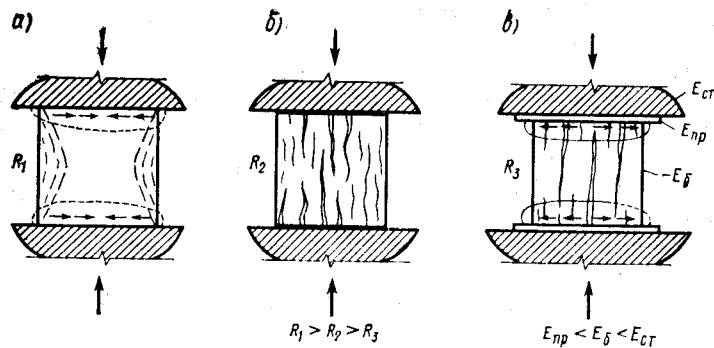


Рис. 5.10. Характер разрушения бетонных кубов при различных условиях испытания:

а — обычная схема испытания (пунктиром показана ориентировочная область влияния «эффекта обоймы»); б — при смазке опорных поверхностей; в — при применении податливых прокладок

зультатов, поэтому был принят другой путь определения действительной прочности бетона, исключаяй поддерживающее влияние эффекта обоймы, а именно испытание призм, о чем более подробно говорится ниже.

Если между плитами пресса и образцом поместить достаточно толстую прокладку, модуль деформации которой меньше модуля деформации бетона, то в ней возникают растягивающие деформации, превышающие деформации бетона, вследствие чего прокладки будут способствовать разрыву бетона, и прочность контрольных кубов может оказаться на 35 ... 50 % меньше, чем при испытаниях по стандартной методике (рис. 5.10, в).

Вследствие действия эффекта обоймы значительное влияние на результаты испытаний оказывают размер и форма контрольного образца. Эффект обоймы проявляется только в узком слое бетона, прилегающем к плитам пресса, поэтому чем сильнее раздвинуты плиты пресса, т. е. больше размер образца, тем меньше проявляется эффект обоймы, и при испытании фиксируются меньшие значения прочности образцов, приготовленных из одного и того же бетона и твердевших в совершенно одинаковых условиях. При определении марки бетона используют обычно приведенные ниже средние переводные коэффициенты, позволяющие перевести прочность бетона, полученную испытанием кубов разных размеров, на прочность кубов размером 15×15×15 см.

Еще в большей мере проявляется зависимость прочности бетона от его размеров при испытании призм. Если изменять расстояние между плитами пресса в широких пределах, варьируя величину h/a (рис. 5.11), то прочность может изменяться в несколько раз — в тонких образцах она будет в 2 ... 3 раза больше, чем прочность высоких призм. Прочность призм из тяжелого бетона

на 20 ... 30 % меньше, чем прочность, получаемая при испытании кубов. Опыты показывают, что при $h/a > 3$ уже не наблюдается изменения прочности бетона при дальнейшем увеличении значений h/a , т. е. влияние эффекта обоймы и ряда других методических факторов практически не проявляется. Поэтому при проектировании железобетонных конструкций используют призмную прочность бетона как величину, в наибольшей степени характеризующую действительную прочность бетона в конструкции.

Степень влияния эффекта обоймы будет зависеть также от вида и свойств бетона. В слабых и более деформативных бетонах влияние деформаций плит пресса затухает быстрее и распространяется на меньший объем образца, вследствие чего влияние эффекта обоймы уменьшается. Поэтому для легких бетонов низких марок можно с определенной степенью приближения принимать прочность бетона кубов разных размеров одинаковой. В значительной мере структура и прочность бетона влияют и на его призмную прочность. Соотношение $R_{пр}/R_{куб}$ может изменяться для тяжелого бетона от 0,6 до 0,9, а для легкого бетона — от 0,65 до 1.

Однако то, что при испытании образцов разных размеров получают разные показатели прочности, объясняется не только эффектом обоймы. Здесь проявляются и другие факторы. Чем больше образец, тем выше вероятность появления в нем крупных дефектов, снижающих прочность бетона. На основе статистической теории хрупкого разрушения материалов [14], которая в известной мере применима к разрушению бетона, зависимость среднего предела прочности R от объема образца V можно представить формулой

$$R = R_0 [a + b (V_0/V)^{1/3}], \quad (5.4)$$

где R_0 — предел прочности стандартного образца; a, b, α — эмпирические коэффициенты; V_0 — объем стандартного образца. По результатам опытных данных принимают $a=0,45 \dots 0,7, b=0,4 \dots 0,5, \alpha=3$, однако возможны и более значительные колебания этих коэффициентов.

При испытаниях почти невозможно разделить влияние масштабного фактора, конструкций пресса (о чем говорится ниже), статистических и технологических факторов, поэтому приведенная

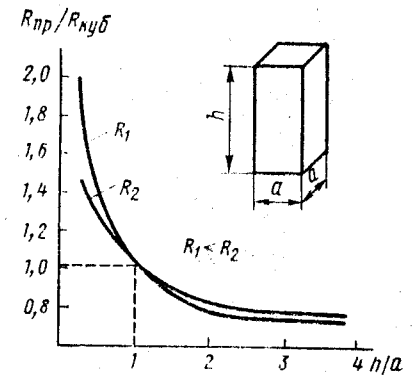


Рис. 5.11. Влияние размеров образца на прочность бетона

выше формула в известной мере отражает влияние различных факторов.

При изготовлении образцов разных размеров на прочность оказывают влияние и технологические факторы. В таких образцах возможны различная степень уплотнения структуры, неодинаковые условия твердения, различные напряжения от усадки и действия внешних факторов и т. д. Все это может повлиять на формирование структуры бетона и прочность контрольных образцов.

Определенную роль играет и организация технологического процесса. Как показывает статистическая теория прочности, чем лучше организован процесс и ниже коэффициент вариации прочности бетона, тем в меньшей мере должен проявляться масштабный эффект.

Заметное влияние на результаты испытаний могут оказать конструкция пресса и определяемые ею условия взаимодействия пресса и образца. Обычно этому не придают существенного значения, хотя указанный фактор может сказаться на результатах испытаний, поэтому остановимся на нем более подробно.

В работе Г. Рюша показано, что на результаты испытаний бетонных кубов большое влияние оказывает жесткость опорных плит пресса. Меньшую прочность могут показать кубы вследствие влияния не только факторов, рассмотренных выше, но также из-за недостаточной толщины и жесткости опорных плит пресса.

В результате проведения специальных исследований были установлены зависимости, определяющие взаимодействие кубов из бетона разных марок с опорной плитой (при опирании ее в одной точке, что имеет место в обычных прессах, рис. 5.12), позволяющие оценить влияние толщины опорной плиты пресса на результаты испытаний. Под действием усилий в плите пресса возникают большие изгибающие напряжения. Если предположить, что допустимое напряжение стали 100 МПа и испытываются кубы из бетона прочностью 60 МПа, то согласно графику на рис. 5.13,а относительная толщина опорной плиты должна быть 0,65а, где а — размер ребра куба. Для кубов размером 20×20×20 см применяют прессы с толщиной плиты $\delta = 0,65 \times 20 = 13$ см.

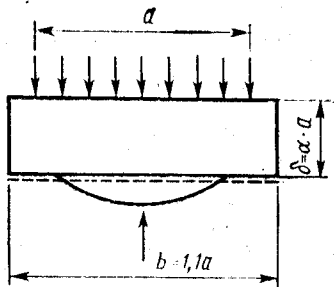


Рис. 5.12. Обычная форма опорных плит и схема их нагружения при испытании бетонных образцов

Вторым критерием для определения необходимой толщины плиты является ее прогиб $f_{пл}$ под нагрузкой. Чтобы обеспечить достаточную равномерность сжимающих напряжений в середине и у краев плиты и прилегающей поверхности образца (разница в напряжениях должна быть менее 10%), нельзя допускать для де-

формации при разрушении отклонений более 20%. Такое условие обеспечивается при толщине плиты $\delta = 0,5$ см (рис. 5.13,б).

Очень существенным является третье условие, которое рассматривает взаимозависимость деформаций плиты и бетонных кубов (рис. 5.13,в). На графике показаны отношения удлинений стали и бетона, которые имеют место в критический момент поперечного расширения бетона при его разрушении. Если это отношение равно 1, то величины удлинений стали и бетона равны. Вследствие этого плита не передает на бетон сжимающего усилия (эффект обоймы отсутствует). Однако при приближении к ребрам куба (к границам опорной поверхности куба) удлинение стали стремится к нулю, вследствие чего возникают очень неравномерные усилия на поверхности образца и может появиться эффект, аналогичный влиянию обоймы.

Обычно на прессах устанавливают плиты толщиной 10 см. Тогда из графика на рис. 5.13,в видно, что при испытании кубов размером 20×20×20 см при $\alpha = 10/20 = 0,5$ в стальной плите возникают различные усилия и деформации в зависимости от прочности испытываемого бетона. Для бетона прочностью 20 МПа получим завышенное значение прочности куба вслед-

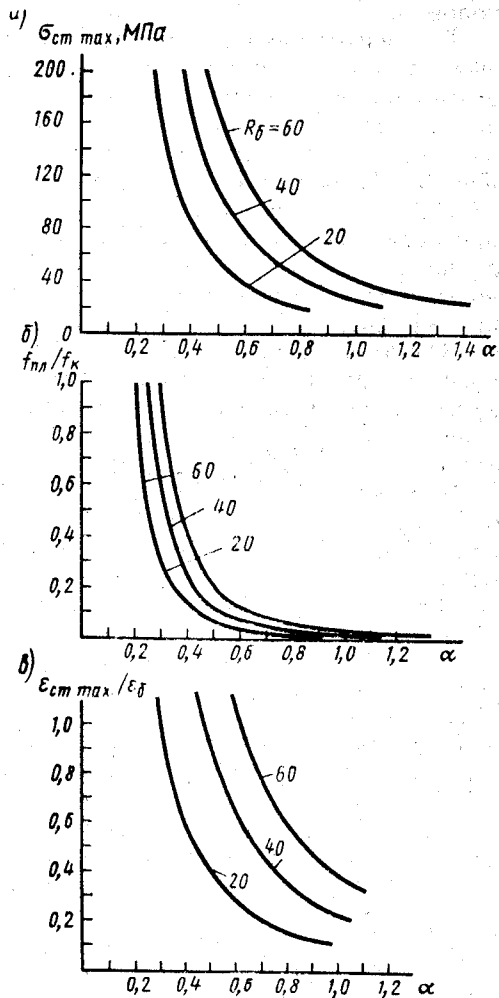


Рис. 5.13. Зависимость напряжений и деформаций плиты пресса при испытании бетонных кубов от относительной толщины плиты $\alpha = \delta/a$:

а — максимальные напряжения в плите $\sigma_{ст\max}$; б — отношение стрелы прогиба $f_{пл}$ плиты пресса к деформации f_k сжатия бетонного куба при разрушении; в — отношение максимального удлинения стали $\epsilon_{ст\max}$ к деформации ϵ_b растяжения бетонного куба при разрушении

ствие действия эффекта обоймы (отношение $k = \varepsilon_{ст \max} / \varepsilon_{об} = 0,4$). Для бетона с прочностью 40 МПа эффект обоймы центральной части куба почти исчезает ($k = 0,9$), а его общее воздействие заметно уменьшается. На бетонные кубы прочностью 60 МПа удлинение плиты оказывает разрывающее воздействие, что приводит к снижению результата определения прочности бетона, регистрируемого при испытании (по сравнению с призменной прочностью, на которую напряженное состояние плит пресса почти не влияет).

Степень влияния эффекта обоймы изменяется также в зависимости от размера образца. Например, для бетона прочностью 40 МПа при испытании кубов с ребром 30 см $\alpha = 0,33$ и $k > 1$, т. е. удлинение стали способствует разрушению бетона, при испытании кубов с ребром 20 см $\alpha = 0,5$, $k = 0,9$ и начинает проявляться слабый эффект обоймы, при испытании кубов с ребром 10 см $\alpha = 1$, $k = 0,21$, т. е. удлинение плит пресса здесь наибольшее и эффект обоймы заметен.

При испытании образцов из бетона прочностью 20 МПа эффект обоймы наблюдается уже у кубов с ребром 30 см ($k = 0,85$) и значительно увеличивается у образцов меньших размеров. Таким образом, воздействие плит пресса на бетон с уменьшением его прочности возрастает, однако, как уже указывалось выше, вследствие повышения деформативности бетона оно воздействует на меньший объем бетона, что уменьшает влияние эффекта обоймы.

При применении жестких опорных плит достаточной толщины характер разрушения соответствует рис. 5.10,а, а при применении опорных плит недостаточной жесткости можно наблюдать характер разрушения, показанный на рис. 5.10,в. Соответственно снижается прочность бетона. Как показывают опыты, чтобы уменьшить влияние плит пресса до допустимой величины, необходимо, чтобы их толщина была более 0,5 от размера ребра куба при опирании плиты в одной точке. Если можно применить плиты, опирающиеся в двух точках, то значение α может быть уменьшено до 0,35.

Рассмотренные выше положения показывают большое влияние методики испытаний на результаты определения прочности бетона. Поэтому для получения достоверных результатов следует организовывать и проводить испытания в точном соответствии с ГОСТами и рекомендациями других нормативных документов.

§ 5.3. ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ

В рабочих чертежах конструкций или в стандартах на изделия обычно указывают требования к прочности бетона, его класс или марку.

Для конструкций, которые проектируют с учетом требований СТ СЭВ 1406—78, прочность бетона на сжатие характеризуется классами. Класс бетона определяется величиной гарантированной

прочности на сжатие с обеспеченностью 0,95. Бетоны подразделяют на классы; В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В35; В40; В50; В55; В60.

На производстве контролируют среднюю прочность или марку бетона. Между классом бетона и его средней прочностью имеется зависимость

$$B = \bar{R}(1 - tv),$$

где B — класс бетона по прочности, МПа; \bar{R} — средняя прочность, которую следует обеспечить при производстве конструкций, МПа; t — коэффициент, характеризующий принятую при проектировании обеспеченность класса бетона; v — коэффициент вариации прочности бетона. Для перехода от класса бетона B к средней прочности бетона (МПа), контролируемой на производстве для образцов $15 \times 15 \times 15$ см (при нормативном коэффициенте вариации 13,5 % и $t = 0,95$) следует применять формулу $R_6^{cp} = B/0,778$. Например, для класса В5 получим среднюю прочность $R_6^{cp} = 6,43$ МПа, а для класса В40 — $R_6^{cp} = 51,4$ МПа.

В настоящее время происходит переход в нормативных документах от марки к классу бетона, однако для некоторых специальных конструкций и в ряде действующих нормативов применяется марка бетона. Поэтому далее используются понятия как о классе, так и о марке бетона. Средняя прочность или марка тяжелого бетона определяется пределом прочности (МПа) при сжатии стандартных бетонных кубов $15 \times 15 \times 15$ см, изготовленных из рабочей бетонной смеси в металлических формах и испытанных в возрасте 28 сут после твердения в нормальных условиях (температура 15 ... 20 °С, относительная влажность окружающего воздуха 90 ... 100 %). В строительстве используют следующие марки: М50, М75, М100; М150, М200, М250, М300, М350, М400, М450, М500, М600 и выше (через М100). На производстве необходимо обеспечить среднюю прочность или заданную марку бетона. Превышение заданной прочности допускается не более чем на 15 %, так как это ведет к перерасходу цемента.

Кубы размером $15 \times 15 \times 15$ см применяют в том случае, когда наибольшая крупность зерен заполнителя 40 мм. При другой крупности заполнителя можно использовать кубы иных размеров, однако размер ребра контрольного бетонного образца должен быть примерно в три раза больше максимальной крупности зерен заполнителя. Для определения марки бетона на кубах с другими размерами вводят следующие переходные коэффициенты, на которые умножают полученную в опытах прочность бетона:

Размер куба, см	7×7×7	10×10×10	15×15×15	20×20×20
Коэффициент	0,85	0,85	1	1,05

На практике наблюдаются значительные отклонения от приведенных выше коэффициентов, так как их значение зависит от жесткости опорных плит пресса, марки бетона и других факторов. Для

получения более достоверных результатов необходимо, чтобы толщина опорных плит пресса была не менее половины величины ребра испытываемого куба. В этом случае действительные переходные коэффициенты могут оказаться выше рекомендованных и проектирование бетона с использованием последних повышает запас прочности конструкции.

Среднюю прочность легкого бетона определяют также при сжатии кубов $15 \times 15 \times 15$ см. При испытании кубов других размеров переходный коэффициент не вводится. Для легких бетонов установлены классы: В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В35; В40.

При изготовлении сборных железобетонных конструкций, а также при срочных работах, когда используются быстротвердеющие цементы или применяют различные способы ускорения твердения бетона, прочность его определяют в более короткий срок твердения, например в возрасте 1, 3, 7 сут. Наоборот, бетоны на медленно твердеющих цементах, применяемые в монолитных массивных сооружениях, могут иметь расчетные сроки твердения, превышающие 28 сут (60, 90 и 180 сут). Увеличение расчетного срока твердения бетона обычно ведет к экономии цемента. Назначенные сроки твердения должны быть технически и экономически обоснованы.

Для правильного определения состава бетона важно знать, как зависит его прочность от качества цемента и заполнителей, соотношения между составляющими и прочих факторов. Прочность бетона в определенный срок при твердении в нормальных условиях зависит главным образом от прочности (активности) цемента и водоцементного отношения.

● Под водоцементным отношением понимают отношение массы воды к массе цемента в свежизготовленной бетонной смеси, причем учитывают только свободную, не поглощенную заполнителем воду. Прочность бетона повышается с увеличением прочности цемента или уменьшением водоцементного отношения. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$R_0 = R_u / [A (V/C)^{1/2}], \quad (5.5)$$

где R_0 — прочность бетона после 28 сут нормального твердения; R_u — активность цемента; A — коэффициент, учитывающий влияние других факторов; V/C — водоцементное отношение.

Зависимость прочности бетона от водоцементного отношения вытекает из физической сущности формирования структуры бетона и графически изображается в виде гиперболических кривых (рис. 5.14). Как известно, цемент при твердении в зависимости от качества и срока твердения присоединяет всего 15 ... 25 % воды от массы цемента. Вместе с тем для придания бетонной смеси пластичности в бетон добавляют воды значительно больше (40 ... 70 % от массы цемента, $V/C = 0,4 \dots 0,7$), так как при $V/C = 0,2$ бе-

тонная смесь является почти сухой и ее нельзя качественно перемещать и уложить. Избыточная вода, не вступающая в химические реакции с цементом, остается в бетоне в виде водяных пор и капилляров или испаряется, оставляя воздушные поры. В обоих случаях бетон будет ослаблен наличием пор, и чем больше их, т. е. чем больше V/C , тем ниже прочность бетона. Таким образом, закон водоцементного отношения, по существу, выражает зависимость прочности бетона от его плотности или пористости.

Зависимость прочности бетона от его водоцементного отношения выполняется лишь в определенных пределах. При очень низких водоцементных отношениях, даже при повышенных расходах цемента и воды, не удается получить удобообрабатываемые бетонные смеси и необходимую плотность бетона, поэтому зависимость $R_0 = f(V/C)$ нарушается: с дальнейшим уменьшением V/C прочность бетона не увеличивается, а затем даже начинает уменьшаться (левая ветвь кривых на рис. 5.14). Определенную роль в снижении прочности бетона в этом случае играет и тот факт, что для гидратации цемента необходим некоторый избыток воды (в 2 ... 3 раза) по сравнению с тем количеством, которое непосредственно вступает во взаимодействие с цементом. Резкое уменьшение этого избытка влечет за собой замедление гидратации и, следовательно, понижение прочности бетона.

Зависимость прочности от водоцементного отношения строго соблюдается лишь при испытании бетона на одинаковых материалах с близкой подвижностью бетонной смеси и при применении одинаковых приемов приготовления и укладки бетона. На прочность бетона, хотя и менее существенно, чем R_u и V/C , но заметное влияние оказывают вид цемента, свойства заполнителей, способы приготовления образцов и другие факторы.

Таким образом, в действительности имеется не одна строгая кривая, выражающая зависимость $R_0 = f(V/C)$, а некоторая полоса (рис. 5.15), на которой укладывается большинство опытных результатов с учетом возможных колебаний прочности бетона, вызванных влиянием других факторов. Однако для облегчения расчетов часто используют средние кривые для зависимости R_0 от V/C или выражающие их формулы. В формулах прочности бетона влияние качества цемента, заполнителей и других факторов обычно учитывают применением эмпирических коэффициентов.

На практике могут наблюдаться заметные отклонения прочно-

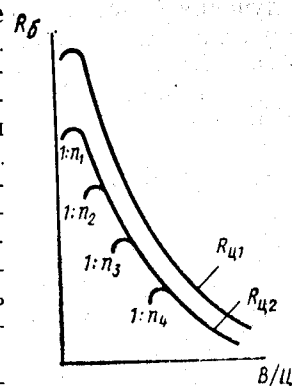


Рис. 5.14. Зависимость прочности бетона от V/C и R_u :
1 : n_i — отношение массы цемента к массе заполнителя $R_{u1} > R_{u2}$

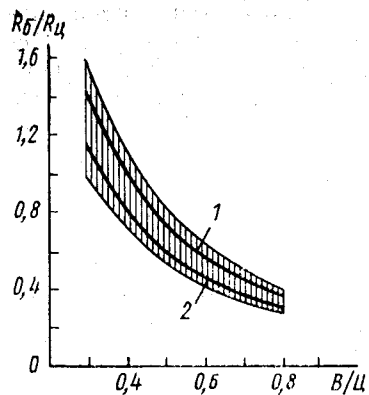


Рис. 5.15. Зависимость средней прочности бетона от В/Ц, используемая при проектировании состава бетона, и возможные отклонения прочности бетона от средних значений:
1 — бетон на щебне; 2 — бетон на гравии

сти бетона от значений, определенных по той или иной средней кривой или формуле. В отдельных случаях действительная прочность может отличаться от расчетной в 1,3 ... 1,5 раза. Поэтому при проектировании состава бетона полученный расчетом состав бетона принято проверять в контрольных замесах.

С развитием технологии бетона факторов, влияющих на прочность бетона, становится все больше, так как расширяется ассортимент цементов, заполнителей, возникают новые технологические приемы приготовления, укладки и выдерживания бетонной смеси, поэтому особое значение приобретают предварительные испытания бетона на материалах, предназначенных к применению в соответствии с намечающейся технологией. Испытания обя-

зательны также при большом объеме работ, так как они дают возможность получить более надежную зависимость прочности бетона от водоцементного отношения и других факторов, которой и следует пользоваться в дальнейшем. Если предварительные испытания не проводились, то эту зависимость можно уточнить в процессе производства при контрольных испытаниях бетона.

В практике строительства материалы и технология, применяемые на данном объекте или заводе, как правило, не меняются в процессе производства и главным фактором, позволяющим получать бетоны разной прочности, является водоцементное отношение. Это еще раз подчеркивает важное значение закона водоцементного отношения для технологии бетона.

Для определения состава бетона более удобна не зависимость его прочности от водоцементного отношения, а обратная зависимость прочности от цементно-водного отношения. При изменениях цементно-водных отношений от 1,3 до 2,5 эта зависимость является прямолинейной и может быть выражена формулой

$$R_6 = AR_{ц}(\frac{Ц}{В} - C), \quad (5.6)$$

где R_6 — прочность бетона в возрасте 28 сут; A и C — эмпирические коэффициенты, учитывающие влияние заполнителей и других факторов на прочность бетона; в среднем $A=0,6$; $C=0,5$; $\frac{Ц}{В}$ — цементно-водное отношение.

Зависимости (5.5) и (5.6) справедливы только для плотно уложенного бетона, получающегося при применении подвижной бетонной смеси. Жесткие бетонные смеси требуют для тщательного уплотнения особых приемов (длительного вибрирования, сильного трамбования, прокатки или прессования). Если при уплотнении бетона в нем сохраняются воздушные поры, то в этом случае объемом воздушных пор прибавляют к объему пор, оставшихся от воды, подставляя в формулы вместо V значения $V+VV$, где VV — объем воздушных пор.

Действительная прочность бетона может быть определена только испытанием контрольных образцов, твердеющих в условиях, аналогичных условиям твердения бетонных сооружений, или испытанием бетона в самом сооружении.

§ 5.4 ОБОБЩЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ОТ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ И ДРУГИХ ФАКТОРОВ

В расчетах состава бетона обычно используют средние зависимости прочности бетона от различных факторов, выведенные на основании многочисленных опытов. Результаты испытаний, получаемые в отдельных лабораториях, могут отличаться от средних значений, так как на них сказываются качество материалов, особенности используемого оборудования, квалификация исполнителей.

О возможных колебаниях прочности бетона при изменении водоцементного отношения и других факторов можно судить по материалам работы, выполненной рядом лабораторий при введении нового ГОСТа на испытание цемента. В результате были получены средние зависимости, используемые в технологических расчетах.

При проведении работы было применено 197 партий цемента с 40 цементных заводов, использовано 39 разновидностей крупного заполнителя, в том числе щебень из изверженных и осадочных (карбонатных) пород, гравий, щебень, полученный дроблением гравия, и 17 разновидностей песка, преимущественно средней крупности и в отдельных случаях мелкого.

Опыты подтвердили, что при значении $\frac{В}{Ц}=0,4 \dots 0,7$ существует прямолинейная зависимость между прочностью бетона, активностью цемента и цементно-водным отношением. При одинаковом водоцементном отношении прочность бетона мало зависит от подвижности бетонной смеси: предел прочности образцов, приготовленных из жесткой бетонной смеси, был выше прочности образцов из пластичной смеси в среднем всего на 1 ... 5%. Путем обобщения опытных данных выведена единая формула с усредненными коэффициентами

$$R_6 = 0,56R_{ц}(\frac{Ц}{В} - 0,5). \quad (5.7)$$

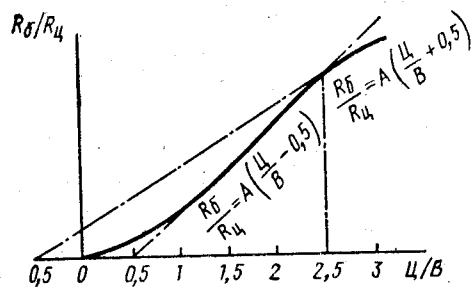


Рис. 5.16. Зависимость прочности бетона от Ц/В

Среднее отклонение значений $R_6/R_{ц}$, определенных по формулам, полученным в отдельных лабораториях, от значений, определенных по формуле (5.7), составляет 12 ... 13 %. Максимальное отклонение не более 25 %.

Опыты показали, что замена щебня гравием вызывает снижение $R_6/R_{ц}$ до 25 %. Уменьшение $R_6/R_{ц}$ отмечалось также

при применении мелкого песка, местных слабых заполнителей или цемента низких марок.

При Ц/В свыше 2,5 прямолинейная зависимость между прочностью бетона и Ц/В нарушается. Действительные значения прочности получаются ниже расчетных. Так, при Ц/В=3,33 (В/Ц=0,3) среднее снижение прочности составило 12 %.

Для практических целей удобно зависимость $R_6=f(Ц/В)$ при Ц/В > 2,5 принимать прямолинейной, но с меньшим углом наклона прямой, чем при Ц/В < 2,5. Ошибка расчетов в этом случае не превысит 2 ... 4 %. При обобщении результатов опытов для этого участка получена средняя формула прочности

$$R_6 = 0,36R_{ц}(Ц/В + 0,53). \quad (5.8)$$

Таким образом, зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения и активности цемента не может быть выражена одной формулой. Строго говоря, эта зависимость вовсе не прямолинейная, а представляет собой довольно сложную кривую (рис. 5.16). Однако для практических целей эту кривую можно заменить двумя прямыми и для расчета состава бетона использовать две эмпирические формулы:

для бетонов с В/Ц $\geq 0,4$ (Ц/В $\leq 2,5$)

$$R_6 = AR_{ц}(Ц/В - 0,5); \quad (5.9)$$

для бетонов с В/Ц $\leq 0,4$ (Ц/В $\geq 2,5$)

$$R_6 = A_1R_{ц}(Ц/В + 0,5). \quad (5.10)$$

Значения коэффициентов A и A_1 принимаются по табл. 5.2.

При В/Ц=0,4

$$AR_{ц}(Ц/В - 0,5) = A_1R_{ц}(Ц/В + 0,5).$$

Приведенные формулы справедливы для бетонов из умеренно жестких и подвижных бетонных смесей, уложенных вибрацией при

Таблица 5.2. Значения коэффициентов A и A_1 в формулах (5.9) и (5.10)

Материалы для бетона	A	A_1
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,6	0,4
Пониженного качества	0,55	0,37

Примечание. Высококачественные материалы: щебень из плотных горных пород высокой прочности, песок оптимальной крупности и портландцемент высокой активности, без добавок или с минимальным количеством гидравлической добавки; заполнители чистые, промытые, фракционированные с оптимальным зерновым составом смеси фракций. Рядовые материалы: заполнители среднего качества, в том числе гравий, портландцемент средней активности или высокомарочный шлакопортландцемент. Материалы пониженного качества: крупные заполнители низкой прочности и мелкие пески, цементы низкой активности.

коэффициенте уплотнения не ниже 0,98. При определении состава бетона формулу прочности обычно используют для назначения водоцементного отношения, обеспечивающего заданную прочность бетона при определенной активности цемента. Чтобы определить, какую из формул использовать в том или ином случае, сравним прочность бетона и цемента при В/Ц=0,4, наиболее часто применяемом при определении прочности портландцемента. В этом случае в среднем при $A=0,6$

$$R_6 = 0,6R_{ц}(2,5 - 0,5) = 1,2R_{ц}.$$

Таким образом, прочность бетона оказывается на 10 ... 30 % (при $A=0,55 \dots 0,65$) выше прочности нормального цементного раствора. Это можно объяснить, с одной стороны, тем, что цементный раствор вследствие особенностей структуры и приготовления имеет большую пористость (на 3 ... 5 %), чем бетон, а с другой стороны, применением однофракционного окатанного вольского песка, что также снижает прочность раствора (по нашим опытам, прочность раствора на вольском песке была на 15 ... 25 % ниже прочности раствора на хорошем строительном песке при одинаковых значениях водоцементного отношения).

Формулу (5.10) следует применять при $R_6 \geq 2AR_{ц}$.

В коллективном эксперименте было изучено также влияние пропаривания на прочность бетона. Образцы пропаривали по режиму 3+8+4 ч при температуре изотермического прогрева 80 °С и испытывали в возрасте 1 сут. Перед пропариванием образцы выдерживали 2 ч при нормальной температуре. Прочность образцов при сжатии после пропаривания в среднем составила 81 % (от марки бетона) при В/Ц=0,3; 75 % при В/Ц=0,4; 71 % при В/Ц=0,5 и 63 %, при В/Ц=0,6 ... 0,7.

Прочность бетона сборных железобетонных конструкций, подвергающихся пропариванию, можно ориентировочно определять по

проведенным выше формулам, считая, что после пропаривания в возрасте 1 сут прочность бетона составляет приблизительно 70 % его марки, или по зависимостям, полученным опытным путем (см. гл. 9).

§ 5.5. ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРИ ИЗГИБЕ

Для тяжелых бетонов, применяемых в строительстве дорог и аэродромов, устанавливаются марки бетона по прочности на растяжение при изгибе, которые определяют путем испытания балочек квадратного сечения (табл. 5.3). Балку испытывают с приложением сил в 1/3 пролета.

Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$ (МПа) вычисляют по формуле

$$R_{изг} = kP_{max} / (bh^2), \quad (5.11)$$

где P_{max} — разрушающая сила, кН; b — ширина образца, см; h — высота образца, см; k — коэффициент; для балочек длиной 40 см $k=31,5$; длиной 50 см $k=45$; длиной 80 см $k=57$.

Прочность бетона при изгибе в несколько раз меньше его прочности при сжатии. Марки бетона на растяжение при изгибе: М5, М10, М15, М20, М25, М30, М35, М40, М45, М50.

Прочность бетона при изгибе зависит от тех же факторов, что и прочность бетона при сжатии, однако количественные зависимости в этом случае получаются другими. Соотношение $R_{сж}/R_{изг}$ повышается с увеличением прочности бетона (рис. 5.17). На практике обычно трудно достигнуть прочности бетона при изгибе более 6 МПа.

Более точная зависимость прочности бетона при изгибе от качества цемента получается, если в ней учитывается активность цемента на изгиб, которую определяют в соответствии с ГОСТ 310.4—81. В этом случае можно использовать в расчетах формулу

$$R_{изг} = A_n R_{ц}' (Ц/В - 0,2), \quad (5.12)$$

где $R_{изг}$ — прочность бетона при изгибе; A_n — эмпирический коэффициент, для высококачественных материалов $A_n=0,42$, для рядовых материалов — 0,4, для материалов пониженного качества — 0,37; $R_{ц}$ — активность цемента при изгибе.

Таблица 5.3. Размеры стандартных балочек

Наибольшая крупность зерен заполнителя, мм	Размеры балочки, мм		
	сечение	длина	расстояние между опорами
30	100×100	400	300
50	150×150	600	450
70	200×200	800	600

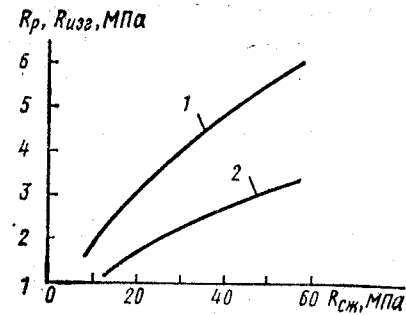


Рис. 5.17. Зависимость прочности бетона от прочности при сжатии: 1 — при изгибе $R_{изг}$; 2 — при растяжении R_p

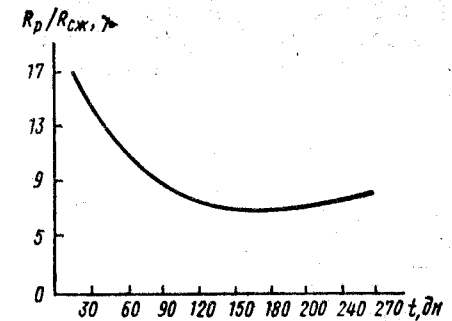


Рис. 5.18. Зависимость отношения $R_p/R_{сж}$ от возраста бетона

С увеличением возраста бетона его прочность при изгибе и растяжении возрастает более медленно, чем прочность при сжатии, и соотношение $R_p/R_{сж}$ уменьшается (рис. 5.18).

§ 5.6. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ОТ ЕГО СОСТАВА

Общие закономерности, показывающие зависимость прочности бетона от различных факторов, были рассмотрены в предыдущих главах. Однако на практике составы и структура бетона могут изменяться в широких пределах и в ряде случаев это необходимо учитывать и вносить определенные коррективы в основные зависимости при проектировании состава бетона.

Материалы (цемент, песок, гравий) могут по-разному влиять на свойства бетонов, различающихся по составу и структуре. В одних составах наилучшим образом проявляются их положительные свойства, в других — материалы используются нерационально. Неодинаково сказываются на бетонах различных составов и структуры и особенности технологии.

Предполагая условия приготовления и формирования бетона одинаковыми, рассмотрим возможное изменение структуры и свойств бетона в двух случаях: при изменении цементно-водного отношения при постоянных соотношениях содержания цемента и заполнителя в бетоне и при изменении соотношения цемента и заполнителя при постоянном значении подвижности бетонной смеси или цементно-водного отношения.

Смесь цемента и заполнителя может связывать и удерживать строго определенное количество воды, находящейся на поверхности частиц твердой фазы, в ее порах и капиллярах. При недостатке воды смесь становится неудобоукладываемой, в бетоне вследствие недоуплотнения и недостатка жидкой фазы увеличивается количество пор и пустот, ухудшается качество сцепления между

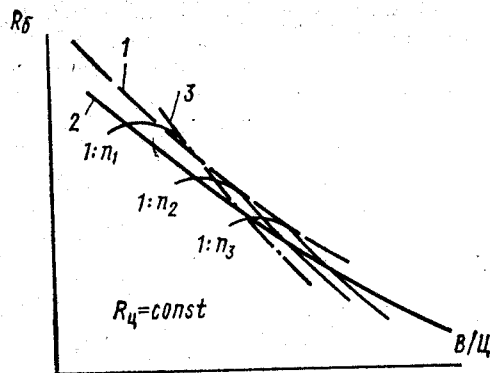


Рис. 5.19. Возможные случаи построения кривых зависимости прочности бетона от В/Ц

Оптимальные значения Ц/В зависят от соотношения между цементом и заполнителем и их свойств, так как эти факторы определяют водоудерживающую способность бетонной смеси и ее удобоукладываемость. При оптимальных Ц/В бетон имеет наибольшую плотность, достигаемую при данном способе уплотнения бетонной смеси.

При анализе кривых $R_6 = f(V/C)$ важно знать, для каких цементно-водных отношений — оптимальных или отличных от них — построены эти кривые. На рис. 5.19 показано возможное построение кривых $R_6 = f(V/C)$ при постоянном R_u . Для оптимальных значений В/Ц при разных Ц/З кривая 1 будет лежать выше, чем кривая 2, соответствующая широкому пределам колебаний В/Ц, включая и крайние точки, соответствующие понижению прочности бетона по сравнению с оптимальными составами. Средняя кривая 3 значений $R_6 = f(V/C)$ при небольших колебаниях Ц/З пойдет круче, чем кривая 2, соответствующая более общему случаю. В своих расчетах мы обычно используем средние кривые (типа кривой 2), полученные статистической обработкой опытных данных. На их положение кроме отмеченных факторов влияют тщательность перемешивания и уплотнения бетонной смеси, размеры контрольных образцов и др.

В действительности возможно отклонение результатов испытаний от средних значений, и это отклонение обычно учитывается, с одной стороны, коэффициентом А, а с другой — экспериментальной проверкой пробных составов. При тщательной технологии возможно получение бетона большей прочности, чем ожидается по формулам (5.9) и (5.10).

На прочность бетона, а также на водопотребность бетонной смеси оказывают заметное влияние колебания соотношения Ц/З

цементным камнем и заполнителем, понижается прочность бетона. При избытке воды начинается расслаивание бетонной смеси, отделение излишней воды вместе с частью цемента, также приводящее к снижению его прочности. Поэтому только при определенных пределах Ц/В (если Ц/З = const) бетонная смесь будет оптимальной по структуре и свойствам, будет наилучшим образом укладываться и уплотняться.

при постоянных значениях Ц/В или подвижности бетонной смеси. Как было показано в гл. 4, в зависимости от соотношения Ц/З бетон может иметь три типа структуры, вследствие этого влияние составляющих на его свойства также будет различным.

Каждая структура имеет свои закономерности, определяющие ее свойства и влияние на них различных факторов. Так, для структуры первого типа, когда зерна заполнителя не соприкасаются друг с другом, решающее значение имеют свойства цемента; в структуре второго и особенно третьего типа, где заполнитель создает жесткий скелет, а его зерна находятся в контакте друг с другом (через тонкую цементную прослойку), на свойства бетона заметное влияние оказывают свойства не только цемента, но и заполнителя. Эти зависимости свойств бетона от структуры и качества материалов следует учитывать при проектировании его состава.

Как отмечалось, переход структуры от одного типа к другому совершается постепенно, поэтому границы между типами различных структур условны и, кроме того, могут значительно сдвигаться при изменении свойств цемента и заполнителя, подвижности бетонной смеси, методов формирования и других факторов. Наиболее оптимальными по своим свойствам будут составы с таким соотношением Ц/З, при котором цементное тесто полностью заполняет пустоты между зернами заполнителя с небольшой раздвижкой его зерен (по Б. Г. Скрамтаеву, на $2d_{ср}$ зерен цемента).

На рис. 5.20 приведены кривые, показывающие изменение водопотребности, В/Ц и Ц/Р₆ при изменении Ц/З для песчаного и обычных бетонов. Перелом кривых $R_6 = f(C/V)$ и $V = f(C/Z)$ соответствует зоне оптимальных составов, в которых свойства материалов используются наиболее полно и для которых характерен наименьший удельный расход цемента на единицу прочности бетона (кривые 5 и 6). Бетон оптимальных составов обладает наилучшим качеством. При меньшем значении Ц/З водопотребность бетонной смеси изменяется мало, но прочность

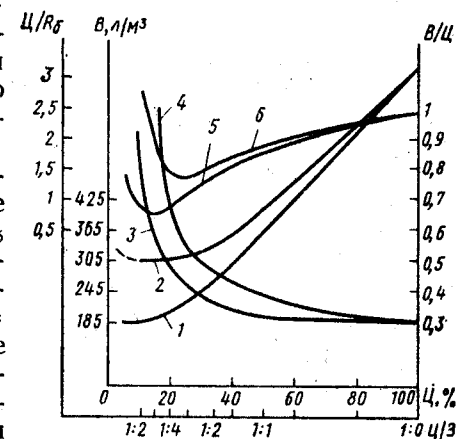


Рис. 5.20. Кривые изменения характеристик бетона в бетонной смеси в зависимости от соотношения Ц/З при постоянной подвижности бетонной смеси:

1 — зависимость водопотребности бетонной смеси от соотношения между цементом и заполнителем для обычного бетона; 2 — то же, для песчаного бетона; 3 — значения В/Ц для бетонных смесей; 4 — то же, для цементно-песчаных смесей; 5 — удельный расход цемента на единицу прочности для обычного бетона; 6 — то же, для песчаного бетона

резко падает вследствие уменьшения плотности бетона из-за недостатка мельчайших частиц твердой фазы. При больших значениях Ц/З прочность бетона повышается, но также резко возрастает водопотребность бетонной смеси вследствие увеличения удельной поверхности твердой фазы. В результате бетон при значениях Ц/З, отличных от оптимальных, оказывается менее экономичным по расходу цемента.

Приведенные кривые позволяют решать ряд важных задач технологии бетона, например определять рациональное соотношение между активностью цемента и прочностью бетона при использовании различных заполнителей. Расчет по данным рис. 5.20 показывает, что для обычного бетона прочностью 30 МПа (кривые 1 и 3) желательнее применять цемент М500, а для мелкозернистого бетона (кривые 2 и 4) — цемент М400. При других заполнителях изменяется расположение кривых на графике и соответственно оптимальное соотношение R_u/R_b . Это соотношение можно варьировать в определенных границах, так как имеется не один, а ряд оптимальных составов (близких между собой).

Отдельные фракции заполнителя по-разному влияют на свойства бетона (табл. 5.4). Крупный плотный заполнитель заметно влияет на прочность бетона при сжатии и в меньшей мере — на подвижность или водопотребность бетонной смеси. Мелкий заполнитель, наоборот, значительно изменяя водопотребность бетонной смеси, меньше влияет на прочность бетона (в оптимальных составах).

Различное влияние фракций заполнителя на свойства бетона объясняется их ролью в структуре. Крупный заполнитель создает каменный скелет в бетоне, заметно влияет на характер напряженного состояния, на деформации и трещинообразование при нагружении бетона. Мелкий заполнитель, располагаясь между зернами крупного, оказывает меньшее влияние на поведение бетона под нагрузкой и, следовательно, на его прочность.

Таблица 5.4. Влияние качества заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона

Бетон	Изменение прочности бетона, %	Изменение водопотребности бетонной смеси, %
Эталонный состав — бетон на гранитном щебне и крупном песке ($M_{кр}=2,79$)	0	0
Бетон на гравии и крупном песке	-13	-6
Бетон на слабом известняке и крупном песке	-42	+12*
Бетон на гранитном щебне и мелком песке ($M_{кр}=0,69$)	-5	+17

* За вычетом воды на водопоглощение.

Влияние крупного заполнителя в бетоне возрастает при уменьшении степени раздвижки его зерен раствором, каким бы путем это ни достигалось: повышением ли жесткости смеси и сокращением расхода цемента или уменьшением крупности песка. В бетоне крупный заполнитель содействует уплотнению прослоек раствора, как бы являясь своеобразным пригрузом, что имеет большое значение при использовании мелких песков. С другой стороны, регулируя влагообмен растворной части, в частности предохраняя ее от излишней потери влаги при выдерживании в неблагоприятных условиях, крупный заполнитель заметно влияет на условия твердения цементного камня. В результате свойства раствора в бетоне отличаются от его свойств в образцах из раствора. Это также в определенной мере объясняет меньшее влияние качества песка на прочность бетона. Например, в наших опытах при замене крупного песка ($M_{ор}=2,79$) мелким ($M_{ор}=0,69$) прочность раствора 1:2 понизилась на 62%, а прочность бетона — всего на 5%. С другой стороны, водопотребность бетонной смеси сильно зависит от удельной поверхности заполнителей и на эту характеристику мелкий заполнитель, удельная поверхность которого в несколько раз больше, чем крупного, оказывает более заметное влияние (см. табл. 5.4).

Таким образом, основные зависимости свойств бетона от различных факторов, которые используют в технологических расчетах, в частности при определении состава, носят средний статистический характер и от них возможны значительные отклонения. Поэтому технологические расчеты рекомендуется проверять опытами.

Наилучшими свойствами обладают бетоны оптимальных составов, в которых свойства материалов используются наиболее полно. Эти бетоны имеют повышенные плотность и прочность при сжатии (при заданном Ц/В), более высокое соотношение $R_p/R_{сж}$ и т. д. Способы проектирования составов бетона, рассмотренные в последующих главах, обеспечивают получение оптимальных или близких к ним составов бетона.

Основные свойства бетонов также можно представить как функцию структурных характеристик — концентрации цементного камня в бетоне и его истинного водоцементного отношения. Эти харак-

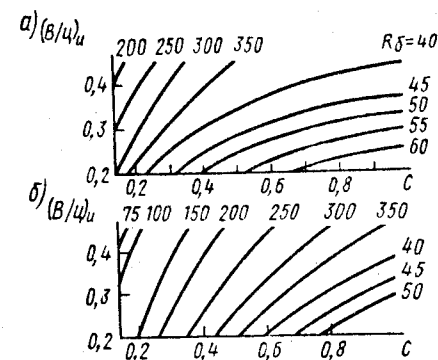


Рис. 5.21. Зависимость прочности при сжатии бетона на гранитном щебне (а) и керамзитовом гравии (б) от объемной концентрации цементного камня в бетоне и его истинного водоцементного отношения

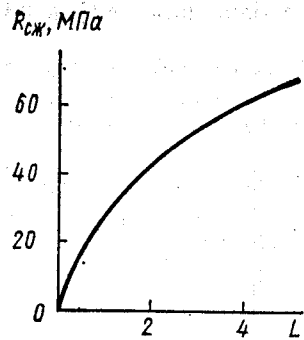


Рис. 5.22. Зависимость прочности бетона на тяжелых и легких заполнителях от обобщенного критерия L .

теристики учитывают влияние как цемента, так и заполнителя (см. гл. 3 и 4). Для подтверждения этого положения на рис. 5.21 приведены результаты испытаний при сжатии бетона, приготовленного на портландцементе М400 и на гранитном щебне или керамзитовом гравии. Зерновой состав заполнителя сохранялся постоянным, концентрация цементного камня изменялась от 0,15 до 1, истинное водоцементное отношение — от 0,2 до 0,45. Опыты показали, что прочность бетона зависит от структурных характеристик: увеличивается при повышении C и уменьшении $(B/C)_н$. Наибольшую прочность имеет цементный камень.

Для более полной характеристики строения бетона необходимо оценить не только его макроструктуру, но и микроструктуру. Микроструктуру можно оценивать по характеру пористости цементного камня и заполнителя, а также пористости, получаемой за счет воздухововлечения при введении химических добавок.

В качестве общей количественной характеристики строения бетона можно воспользоваться условным критерием L , который представляет собой отношение объемной концентрации цементного камня в бетоне при заданном значении $(B/C)_н$ к суммарной пористости бетона P_6 , которая складывается из пористости цементного камня, пористости заполнителя $P_з$ и пористости $P_{вв}$, образованной вовлеченным воздухом:

$$L = \frac{C}{P_6} = \frac{C/\rho_{ц} + (B/C)_н C}{V - 0,2\alpha C + P_з + P_{вв}} \quad (5.13)$$

Критерий учитывает изменение структуры во времени (через степень гидратации цемента α). В формулу подставляют относительные значения пористости.

Особенностью данного критерия является то обстоятельство, что концентрация цементного камня определяется на основе истинного водоцементного отношения. Тем самым учитывается влияние на структуру и свойства бетона заполнителя (через его водопотребность) и процесса формирования структуры (схватывания цемента). Ведь твердение цемента после его схватывания происходит в рамках первоначально сложившейся структуры и от ее строения и свойств во многом будут зависеть окончательные свойства бетона. Если первоначальная структура слабая, с большим количеством пор и дефектов, то и прочность бетона даже после длительного твердения окажется невысокой, так как новообразо-

ванных цементного камня не хватит для исправления дефектов первоначальной структуры.

Использование обобщенного критерия L позволяет получить единую зависимость прочности $R_6 = f(L)$. Эта зависимость, полученная математической обработкой результатов испытаний 150 различных составов бетона на тяжелом и легком заполнителях, показана на рис. 5.22. Зависимость $R_6 = f(L)R_{ц}$ вместе со структурными характеристиками может быть использована при проектировании состава различных видов бетона по единой методике.

§ 5.7. ОДНОРОДНОСТЬ БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ

Качество бетона нельзя оценить только средней его прочностью. На практике всегда наблюдаются отклонения от этой величины. Колебания активности цемента, его нормальной густоты, минералогического состава, свойств заполнителей, дозировки материалов, режимов перемешивания и твердения — все это приводит к неоднородности структуры бетона. Вследствие этого отдельные объемы бетона могут отличаться друг от друга в большей или меньшей степени, что зависит от свойств используемых материалов и отлаженности технологического процесса. Соответственно будут колебаться и показатели свойств бетона: прочность, плотность, проницаемость, морозостойкость и др. Для оценки однородности бетона используют статистические методы. Качество бетона определяется главным образом его средней прочностью (или соответствующим комплексом показателей) и однородностью, которая оценивается по коэффициенту вариации прочности (или других показателей).

Как указывалось, класс прочности бетона связан с его средней прочностью выражением

$$B = \bar{R}(1 - tv). \quad (5.14)$$

При изменении коэффициента вариации определенному классу по прочности будет соответствовать различная средняя прочность. С уменьшением v будет уменьшаться и величина средней прочности. Например, для обеспечения класса В10 при $v = 13,5\%$ требуется средняя прочность 12,85 МПа, а при $v = 7$ средняя прочность 11,3 МПа.

При контроле качества бетона по прочности с учетом его однородности проводят статистическую обработку результатов испытаний бетона за определенный период и определяют характеристики его прочности и однородности. В проектах указываются значения нормируемой прочности бетона (в проектном и промежуточном возрасте, отпускные и передаточные).

● *Требуемая прочность представляет собой минимально допустимое значение фактической прочности бетона в партии, при кото-*

ром будет обеспечена нормируемая прочность с заданной степенью гарантии. Она устанавливается лабораториями заводов и строек в соответствии с достигнутой однородностью бетона в партии.

● Фактическая прочность бетона в партии R_m определяется как среднее значение прочности, определенное по результатам испытаний контрольных образцов или неразрушающими методами непосредственно в конструкции.

● Одновременно с требуемой прочностью определяют средний уровень прочности R_y (заданную прочность), представляющий собой среднее значение прочности бетона, устанавливаемое лабораториями заводов и строек на определенный контролируемый период в соответствии с достигнутой однородностью бетона по прочности, по которому подбирается состав бетона и которое поддерживается в производстве.

В качестве характеристики однородности бетона используют средний коэффициент вариации прочности v_n по всем партиям за анализируемый период.

Прочность бетона в партии R_m (МПа)

$$R_m = \sum_{i=1}^n R_i / n, \quad (5.15)$$

где R_i — единичное значение прочности бетона, МПа; n — общее число единичных значений прочности бетона в партии. За единичное значение принимают среднюю прочность бетона в одной серии образцов или среднюю прочность бетона контролируемого участка конструкции при применении неразрушающих методов контроля.

Продолжительность анализируемого периода для определения характеристик однородности устанавливают от одной недели до двух месяцев. Число единичных значений прочности бетона за этот период должно быть более 30. По результатам испытания вычисляют среднеквадратическое отклонение s_m и коэффициент v_m прочности для всех видов нормируемой прочности бетона. Для сборных конструкций допускается коэффициент v_m для прочности бетона в проектном возрасте не вычислять, а принимать меньше на 15% по сравнению с v_m отпускной прочности.

При числе единичных значений прочности в партии $n > 6$ s_m (МПа) вычисляют по формуле

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n - 1}} \quad (5.16)$$

Если $n = 2 \dots 6$, то $s_m = \omega_m / \alpha$, где ω_m — размах единичных значений прочности в контролируемой партии, МПа, определяемый как

разность между максимальным и минимальным единичными значениями прочности, α — коэффициент, зависящий от n :

Значение n	2	3	4	5	6
Значение α	1,13	1,69	2,06	2,33	2,5

При контроле неразрушающими методами s_m вычисляют с учетом отклонений тарировочной зависимости:

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n - 1} + \frac{s_\tau^2}{p}}, \quad (5.17)$$

где s_τ — среднеквадратическое отклонение тарировочной зависимости, определяемое по ГОСТу на неразрушающие методы контроля прочности; n — число единичных значений (проконтролированных конструкций) в партии; p — число контролируемых участков в конструкции.

Коэффициент вариации прочности бетона v_m (%) в партии

$$v_m = (s_m / R_m) 100. \quad (5.18)$$

Средний коэффициент вариации прочности бетона v_n за анализируемый период

$$v_n = \frac{\sum_{i=1}^N v_{mi} n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (5.19)$$

где v_{mi} — коэффициент вариации прочности в каждой i -й из N проконтролированных в течение анализируемого периода партий бетона; n_i — число единичных значений прочности бетона в каждой i из N партий бетона; $\sum_{i=1}^N n_i$ должно быть более 30.

Требуемую прочность бетона (отпускную, передаточную, в промежуточном и проектном возрастах) при нормировании прочности по классам вычисляют по формуле

$$R_\tau = k_\tau R_n, \quad (5.20)$$

где k_τ — коэффициент требуемой прочности, принимаемый по табл. 5.5 в зависимости от коэффициента вариации v_n ; R_n — нормируемое значение прочности бетона, МПа (отпускной, передаточной, в промежуточном и проектном возрасте), для бетона данного класса.

В начальный период до накопления необходимого для ведения статистического контроля числа результатов испытаний требуемая прочность

$$R_\tau = 1,1 R_n / k_6, \quad (5.21)$$

Таблица 5.5. Значения коэффициента требуемой прочности

Значения v_n , %	Все виды бетона (кроме ячеистых) и конструкций (кроме массивных гидротехнических)	Плотный силикатный бетон	Автоклавный ячеистый бетон	Массивные гидротехнические конструкции
6 и ниже	1,07	1,06	1,08	1,09
7	1,08	1,07	1,09	1,10
8	1,09	1,08	1,10	1,11
9	1,11	1,09	1,12	1,13
10	1,14	1,12	1,13	1,14
11	1,18	1,14	1,14	1,16
12	1,23	1,18	1,17	1,18
13	1,28	1,22	1,22	1,20
14	1,33	1,27	1,26	1,22
15	1,38	1,33	1,32	1,23
16	1,43	1,39	1,37	1,25
17		1,46	1,43	1,28
18			1,50	1,32
19			1,57	1,36
20				1,39
	Область недопустимых значений			

Таблица 5.6. Значения коэффициента k_T'

Значения v_n , %	Все виды бетонов (кроме ячеистых) и конструкции (кроме массивных гидротехнических)	Плотный силикатный бетон	Автоклавный ячеистый бетон	Массивные гидротехнические конструкции
6 и менее	83	82	75	85
7	84	83	76	86
8	85	84	77	87
9	87	85	78	88
10	89	87	79	89
11	92	89	80	91
12	96	92	82	92
13	100	96	85	94
14	104	100	88	95
15	108	105	92	96
16	112	110	96	98
17		115	100	100
18			105	103
19			110	106
20				109
	Область недопустимых значений			

где k_6 — коэффициент, принимаемый для всех бетонов (кроме ячеистого и плотного силикатного) 0,78, для ячеистого — 0,7, для плотного силикатного — 0,75.

Требуемая прочность бетона при нормировании прочности по маркам

$$R_T = R_n k_T' / 100, \quad (5.22)$$

где R_n — нормируемое значение прочности бетона, МПа (отпускной, передаточный, в промежуточном или проектном возрасте), для бетона данной марки; k_T' — коэффициент, принимаемый по табл. 5.6.

В этом случае в начальный период до накопления необходимого для статистического контроля числа результатов испытаний R_T определяют по формуле

$$R_T = 1,1 R_n. \quad (5.23)$$

Средний для контролируемого периода уровень прочности R_y (МПа) (отпускной, передаточной, в промежуточном и проектном возрасте)

$$R_y = R_T k_{мп} \quad (5.24)$$

где $k_{мп}$ — коэффициент, принимаемый в зависимости от v_n :

v_n , %	... < 6	6...7	7...8	8...10	10...12	12...14	> 14
$k_{мп}$... 1,03	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,15

Для тяжелого и легкого бетона $k_{мп}$ должен приниматься не более 1,1, для плотного силикатного бетона — не более 1,13.

ГЛАВА 6

ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

§ 6.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ УСАДКА БЕТОННОЙ СМЕСИ

В процессе приготовления, твердения, эксплуатации в бетоне происходят объемные изменения, возникают деформации материала. Величина их зависит от структуры бетона, свойств его составляющих, особенностей технологии и ряда других факторов. Деформативные свойства бетона учитывают при проектировании конструкций; они оказывают большое влияние на качество и долговечность бетонных и железобетонных сооружений.

Условно деформации бетона можно разделить на следующие виды: собственные деформации бетонной смеси (первоначальная усадка) и бетона (усадка и расширение), возникающие под действием физико-химических процессов, протекающих в бетоне; деформации от действия механических нагрузок, причем различа-

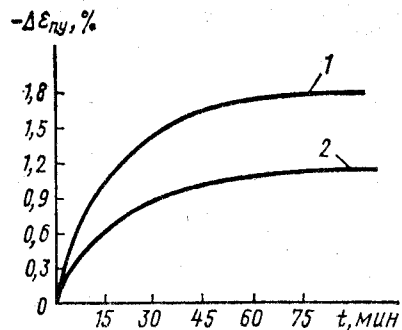


Рис. 6.1. Зависимость первоначальной усадки $\Delta \epsilon_{пу}$ от времени t , прошедшего с момента укладки бетонной смеси:
1 — литая смесь; 2 — подвижная смесь

чительны и превосходят величину усадки затвердевшего бетона в десятки раз.

На рис. 6.1 показан характер развития первоначальной усадки. Деформации интенсивно развиваются в первый момент после укладки и уплотнения бетонной смеси и постепенно затухают уже через 30...90 мин. Если применяются литые смеси, то в первоначальный период на поверхности бетона выделяется слой воды. Водоотделение достигает максимума через 10...20 мин, а затем начинается постепенное всасывание воды в глубь бетона вследствие интенсивного протекания процесса контракции цементного теста.

Величина первоначальной усадки зависит от состава бетонной смеси и свойств использованных материалов. Жесткие бетонные смеси имеют меньшие величины первоначальной усадки, чем пластичные и тем более литые смеси. Первоначальная усадка уменьшается со снижением водосодержания бетонной смеси и уменьшения расхода цементного теста, при применении тонкомолотых

ют деформации от кратковременного действия нагрузок и от длительного действия — ползучесть бетона; температурные деформации бетона.

После укладки бетонной смеси может происходить седиментационное осаждение твердых частиц и постепенное ее уплотнение. Этот процесс наиболее ярко проявляется в пластичных и литых смесях. При этом на поверхности смеси может выделяться вода, изменяться объем смеси. При значительной высоте изделия осадку можно наблюдать невооруженным глазом, так как деформации бетона весьма значительны

Таблица 6.1. Первоначальная усадка бетона

Вид вяжущего	Расход цемента, кг/м³	Первоначальная усадка, %, при расходе воды, кг/м³		
		150	180	210
Портландцемент	310	0,15	0,82	1,64
	500	—	0,21	0,36
Портландцемент с добавкой 20% трепела	310	0,01	0,11	0,42

добавок, хорошо удерживающих воду (трепел, диатомит и др.), при высоком содержании крупного заполнителя, обеспечивающем создание жесткого скелета в бетонной смеси. В табл. 6.1 приведены некоторые значения полной первоначальной усадки обычной бетонной смеси на гранитном заполнителе, полученные при испытаниях в специальных пластмассовых формах — цилиндрах высотой 300 мм и диаметром 100 мм.

На величину первоначальной усадки могут оказать влияние форма, арматурный каркас и производственные факторы. Густое армирование и узкая форма будут препятствовать проявлению первоначальной усадки,

Создание жесткого скелета в бетонной смеси с большим расходом воды, уменьшая внешнюю первоначальную усадку, не может препятствовать протеканию седиментационных процессов между зернами крупного заполнителя. Поэтому в бетоне увеличится доля скрытой усадки, протекающей в отдельных микрообъемах и вызывающей расслоение и ухудшение качества бетонной смеси.

При воздействии на бетонную смесь давления, которое часто применяется при формировании железобетонных изделий, проявляется упругое последствие бетонной смеси. Это приводит к тому, что после снятия нагрузки материал несколько расширяется (рис. 6.2). Сжимаемость бетонной смеси зависит от ее состава и применяемых материалов. Особо большое влияние на величину сжимаемости оказывает вовлеченный воздух: чем больше воздуха, тем сильнее сжимаемость. Если при применении давления воздух и вода могут удаляться из смеси, то упругое последствие будет слабым. Если же воздух сохраняется в бетонной смеси, то величина деформаций упругого последствия будет весьма значительной. Деформации первоначальной усадки и упругого последствия необходимо учитывать при формировании бетонных и железобетонных изделий, так как они влияют на окончательные размеры изделия и качество его открытых поверхностей.

§ 6.2. УСАДКА БЕТОНА

Процесс твердения бетона сопровождается изменениями его объема. Наиболее значительным является уменьшение объема при твердении в атмосферных условиях или при недостаточной влажности среды, получившее название *усадки бетона*. При твердении в воде или во влажных условиях уменьшение объема бетона может не происходить, а в ряде случаев наблюдается даже его незначительное расширение.

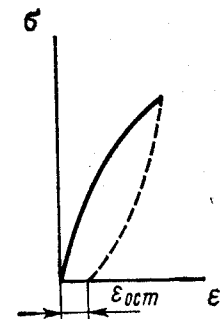


Рис. 6.2. Деформации сжатия при уплотнении бетонной смеси прессованием:
 $\epsilon_{ост}$ — остаточная деформация после снятия нагрузки

● Усадка бетона вызывается физико-химическими процессами, происходящими в бетоне при твердении, и изменением его влажности. Суммарная величина деформаций усадки складывается из ряда составляющих, из которых наиболее существенное значение имеют влажностная, контракционная и карбонизационная деформации, названные так по виду определяющего фактора.

Влажностная усадка вызывается изменением распределения, перемещением и испарением влаги в образующемся скелете цементного камня. Эта составляющая играет ведущую роль в суммарной усадке бетона. Контракционная усадка вызывается тем, что объем новообразований цементного камня меньше объема, занимаемого веществами, вступающими в реакцию. Эта усадка развивается в период интенсивного протекания химических реакций между цементом и водой и не столько изменяет внешние размеры образца, сколько способствует изменениям в поровой структуре материала: уменьшается объем пор, занимаемых водой, возникают воздушные поры. Обычно эта усадка развивается в период затвердения бетона, когда он еще достаточно пластичен, и поэтому не сопровождается заметным растрескиванием материала. Карбонизационная усадка вызывается карбонизацией гидроксида кальция и развивается постепенно с поверхности бетона в глубину.

Усадка бетона, особенно влажностная и карбонизационная, происходящая в уже затвердевшем материале, может привести к возникновению трещин в бетоне, например вдоль предварительно напряженной арматуры, или в изделиях с большой открытой поверхностью, что ухудшает качество конструкций и сооружений и их долговечность. В некоторых случаях может потребоваться ремонт конструкции. Поэтому при проектировании и производстве бетонных и железобетонных изделий необходимо учитывать влияние усадки бетона.

Величина усадки бетона зависит от его состава и свойств использованных материалов. Усадка увеличивается при повышении содержания цемента и воды, применении высокоалюминатных цементов, мелкозернистых и пористых заполнителей. Быстрое высыхание бетона приводит к значительной и неравномерной усадке (усадка поверхностных слоев материала выше) и может вызвать появление усадочных трещин.

Предложены различные зависимости усадки бетона от его состава, однако в реальных условиях действительная усадка может заметно отличаться от расчетных значений, так как на ее величину влияет много факторов, трудно поддающихся учету.

Формулу, связывающую усадку бетона с его составом, предложил Р. Лермит:

$$\varepsilon_{y,ц} / \varepsilon_{y,б} = 1 + \beta V_3 / V_ц, \quad (6.1)$$

где $\varepsilon_{y,ц}$ и $\varepsilon_{y,б}$ — усадки цементного камня и бетона; β — константа материала, которая зависит от В/Ц, крупности заполнителя и других факторов, $\beta = 1,5 \dots 3,1$; V_3 и $V_ц$ — объемы заполнителя и цемента.

Более полно можно оценить влияние различных факторов на усадку бетона ε_y из выражения

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y \max} \xi_{y1} \xi_{y2} \xi_{y3} \xi_{y4}, \quad (6.2)$$

где ε_y — предельное значение деформаций усадки данного бетона; $\varepsilon_{y \max}$ — предельное значение деформаций усадки бетона из смеси определенного состава в заданных исходных условиях; ξ_{yi} — безразмерные коэффициенты, учитывающие относительное влияние различных факторов: В/Ц, содержания цементного теста, размеров образца $a = A/P$ (A — площадь поперечного сечения, P — его периметр) и влажности окружающего воздуха θ .

При определении $\varepsilon_{y \max}$ принимают $V/Ц = 0,5$, $ЦТ = 0,2$, $a = 2,5$ см, $\theta = 70$ %. В формуле отсутствует коэффициент, учитывающий влияние возраста бетона к моменту начала протекания усадки, поскольку продолжительность начального твердения бетона во влажных условиях мало отражается на предельной величине усадки бетона.

Значения коэффициентов ε_{yi} для обычного тяжелого бетона приведены на рис. 6.3. Изменение их позволяет ориентировочно оценить влияние различных факторов на усадку бетона.

§ 6.3. МОДУЛЬ УПРУГОСТИ И ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

● Деформации бетона при приложении нагрузки зависят от его состава, свойств составляющих материалов и вида напряженного состояния. Диаграмма сжатия бетона имеет криволинейное очертание, причем кривизна увеличивается с ростом напряжений (рис. 6.4).

С увеличением прочности бетона уменьшаются его деформации и кривизна диаграммы σ — ε . Низкопрочные бетоны имеют даже нисходящую ветвь диаграммы сжатия. Однако на этом участ-

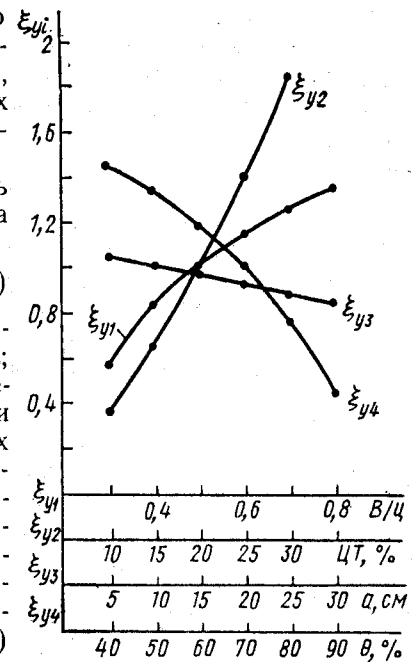


Рис. 6.3. Значения поправочных коэффициентов ξ_y для определения усадки бетона

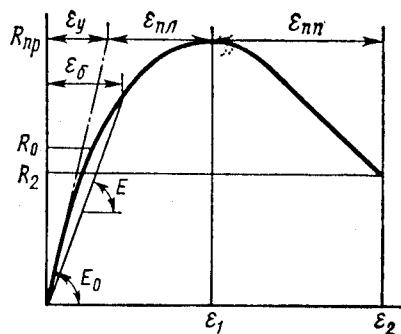


Рис. 6.4. Диаграмма сжатия бетона:

ϵ_y — упругая составляющая деформации; $\epsilon_{пл}$ — пластическая; $\epsilon_{пп}$ — псевдопластическая

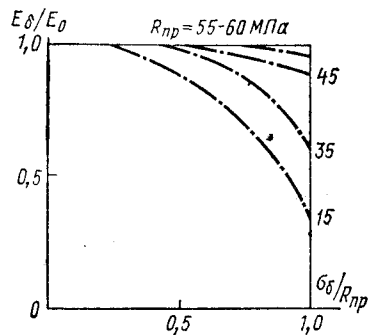


Рис. 6.5. Изменение модуля деформации бетона при нагружении

О деформативных свойствах бетона при приложении нагрузки судят по его модулю деформации, т. е. по отношению напряжения к относительной деформации, вызываемой его действием. Чем выше модуль деформации, тем менее деформативен материал.

Поскольку диаграмма сжатия бетона криволинейна, то его модуль деформации зависит от значений относительных напряжений σ/R , постепенно понижаясь с их увеличением (рис. 6.5), причем тем больше, чем ниже марка бетона. Обычно определяют либо начальный модуль деформации бетона, либо модуль деформации при определенном значении σ/R , например при $\sigma/R=0,5$.

А. Е. Шейкин предложил зависимость, по которой можно определить модуль деформации бетона E_6 при любом значении σ/R в зависимости от начального модуля упругости бетона:

$$E_6 = \frac{E_0}{1 + a(\sigma/R)}, \quad (6.4)$$

ке сплошность материала уже нарушена, в нем возникают микроскопические трещины, отслоение отдельных частей. В железобетонных конструкциях арматура связывает отдельные части бетона в единое целое и для частных случаев расчета конструкций необходимо учитывать нисходящую ветвь диаграммы сжатия бетона.

На характер нарастания деформаций под действием нагрузки влияют также скорость ее приложения, размеры образца, температурно-влажностное состояние бетона и окружающей среды и другие факторы. Деформация бетона включает упругую ϵ_y , пластическую $\epsilon_{пл}$ и псевдопластическую $\epsilon_{пп}$ части (рис. 6.4):

$$\epsilon_6 = \epsilon_y + \epsilon_{пл} + \epsilon_{пп}. \quad (6.3)$$

Соотношение, между ними зависит от состава бетона, использованных материалов и других факторов. Величина пластической и псевдопластической частей возрастает с увеличением длительности нагрузки, понижением прочности бетона, увеличением водоцементного отношения, при применении слабых заполнителей.

где E_0 — начальный модуль упругости бетона; a — коэффициент, учитывающий влияние состава бетона и других факторов на величину его деформаций.

Модуль упругости, или начальный модуль деформации, бетона зависит от его состава, возраста, свойств цемента и заполнителей и других факторов.

Гансен предложил для оценки зависимости модуля упругости от различных факторов использовать выражение

$$E_6 = \frac{V_k + (2 - V_k)(E_3/E_k)}{(2 - V_k) + V_k(E_6/E_k)} E_k, \quad (6.5)$$

где V_k — относительное содержание цементного камня по объему в бетоне; E_3 и E_k — модули упругости заполнителя и цементного камня.

На практике используют эмпирические зависимости модуля деформации от различных факторов. Для расчета железобетонных конструкций важна зависимость модуля деформации от прочности бетона. Ориентировочно средние значения модуля деформации при $\sigma/R_{пр}=0,5$ можно определить по формуле

$$E_6 = \frac{100\,000}{1,7 - (3600/R)}, \quad (6.6)$$

где R — прочность бетона.

В действительности модуль деформации может заметно отличаться от этих средних значений. В табл. 6.2 приведены значения модуля деформации при сжатии некоторых видов бетона, показывающие большое влияние на него технологических факторов.

Важное значение для расчета конструкций и оценки их поведения под нагрузкой имеют величины предельных деформаций, при которых начинается разрушение бетона. По опытным данным, предельная сжимаемость бетона изменяется в пределах 0,0015...0,003, увеличиваясь при повышении прочности бетона. Предельную сжимаемость бетона можно также увеличивать, применяя более деформативные компоненты и обеспечивая достаточное надежное сцепление между ними.

Предельная растяжимость бетона составляет 0,0001...0,0015, т. е. примерно в 15...20 раз меньше его предельной сжимаемости.

Таблица 6.2. Средние значения модуля деформации некоторых видов бетона (МПа)

Вид бетона	Прочность бетона, МПа		
	10	30	50
Обычный тяжелый	19	34	41
Легкий	11	19	—
Мелкозернистый	13	23	30

Предельная растяжимость повышается при введении в бетон пластифицирующих добавок, использовании белитовых цементов, уменьшении крупности заполнителей или при применении заполнителей с высокими деформативными свойствами и сцеплением с цементным камнем.

§ 6.4. ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ

● Под ползучестью бетона понимают его способность деформироваться во времени при длительном действии постоянной нагрузки. Физическая природа ползучести еще недостаточно выяснена, но большинство исследователей считают, что пластические деформации ползучести обуславливаются пластическими свойствами цементного камня и изменением состояния основной составляющей бетона. Деформации ползучести наиболее заметно развиваются в первые сроки после приложения нагрузки и постепенно затухают, но они наблюдаются иногда у бетона в возрасте одного года и больше. Полная деформация ползучести может значительно превосходить деформации, получаемые бетоном в момент загрузки.

Ползучесть бетона зависит от еще большего числа факторов, чем его усадка, причем большинство факторов действует на деформации ползучести подобно их влиянию на деформации усадки. На ползучесть бетона влияют расход и вид цемента, водоцементное отношение, вид и крупность заполнителя, степень уплотнения бетона, степень гидратации цемента к моменту приложения нагрузки, температура и влажность окружающей среды и самого бетона, размеры образца и относительное значение напряжений в бетоне. Ползучесть бетона увеличивается при повышении содержания цемента, увеличении водоцементного отношения, уменьшении крупности заполнителей и повышении их деформативности, например при применении пористых заполнителей.

Для оценки ползучести бетона удобно пользоваться мерой ползучести s , под которой понимается ползучесть бетона при единичной нагрузке:

$$s = \epsilon_{\text{полн}} / \sigma, \quad (6.7)$$

где $\epsilon_{\text{полн}}$ — полная деформация ползучести.

Ориентировочно мера ползучести

$$s_k = s_0 \xi_{n1} \xi_{n2} \xi_{n3} \xi_{n4} \xi_{n5}, \quad (6.8)$$

где s_0 — исходная мера ползучести, принимаемая равной для бетона на обычном портландцементе без ускорителей твердения $15,2 \cdot 10^{-7}$ см²/Н и для бетона на высокопрочном цементе $10,2 \times 10^{-7}$ см²/Н; ξ_{ni} — поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияние времени приложения нагрузки, В/Ц, расхода цемента размеров сечения образца, фактической влажности воздуха.

Приведенные на рис. 6.6 графики изменения поправочных коэффициентов ξ_{ni} наглядно показывают влияние различных факторов на деформации ползучести обычного тяжелого бетона.

§ 6.5. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

● Бетон, как и другие материалы, расширяется при нагревании и сжимается при охлаждении. В среднем коэффициент линейного расширения бетона составляет $10 \cdot 10^{-6}$. Однако в действительности он колеблется в зависимости от состава бетона и свойств заполнителей и вяжущего. С увеличением содержания цементного камня коэффициент линейного расширения α увеличивается. Например, в одном из опытов раствор состава 1:3 имел $\alpha = 10,4 \cdot 10^{-6}$, а цементный камень — $\alpha = 13,1 \cdot 10^{-6}$. Определенное влияние на коэффициент линейного расширения оказывает вид заполнителя. Например, бетон на граните в опытах показал $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-6}$, бетон на керамзите — $\alpha = 7,4 \cdot 10^{-6}$, бетон на известняке — $\alpha = 8,6 \cdot 10^{-6}$. Зависимость коэффициента линейного расширения бетона α_6 от коэффициента линейного расширения заполнителя α_3 приведена на рис. 6.7.

Изменение температуры в пределах 0 ... 50 °С мало влияет на коэффициент температурного расширения сухого бетона, если при этом в бетоне отсутствуют физико-химические превращения. При изменении температуры влажного бетона температурные деформации складываются с влажностной усадкой или расши-

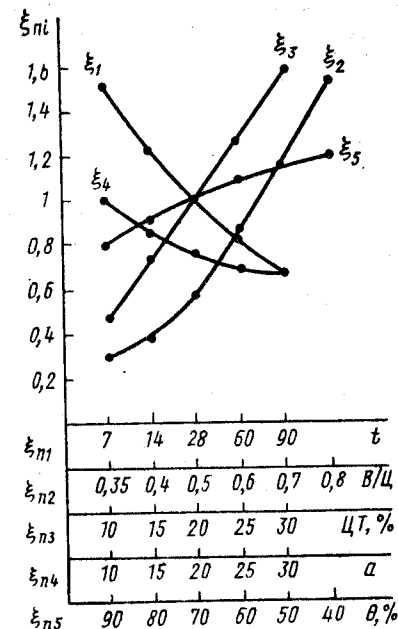


Рис. 6.6. Значения поправочных коэффициентов ξ_{ni} для определения ползучести бетона

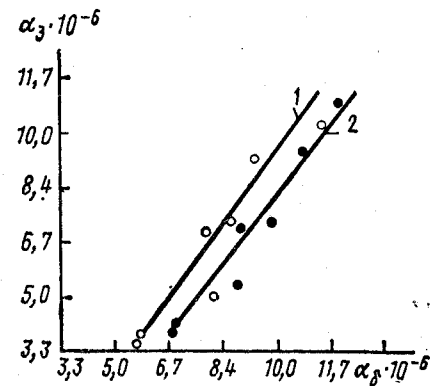


Рис. 6.7. Зависимость коэффициента α_6 линейного расширения бетона от коэффициента расширения линейного заполнителя α_3 :
1 — водное твердение; 2 — воздушное твердение

рением. При замерзании влажного бетона существенное влияние на его деформации оказывает образование льда в порах и капиллярах материала. В ряде случаев вместо деформации сжатия при остывании бетона ниже 0°C могут наблюдаться деформации расширения, вызываемые давлением образующегося льда.

Температурные деформации бетона близки к температурным деформациям стали, что обеспечивает их надежную совместную работу в железобетоне при различных температурах окружающей среды.

ГЛАВА 7

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

§ 7.1. ПЛОТНОСТЬ БЕТОНА

● *Следует различать плотность незатвердевшей бетонной смеси и затвердевшего бетона.* Бетонная смесь может быть почти совершенно плотной (имеется в виду плотность с учетом содержащейся в смеси воды), если она правильно рассчитана и плотно уложена. Плотность такой бетонной смеси довольно точно совпадает с теоретической, рассчитанной по сумме абсолютных объемов материалов, если она не содержит вовлеченного воздуха.

Качество уплотнения бетонной смеси обычно оценивают коэффициентом уплотнения

$$k_{упл} = \rho_d' / \rho_p', \quad (7.1)$$

где ρ_d' и ρ_p' — действительная и расчетная плотность бетонной смеси.

Обычно стремятся получить коэффициент $k_{упл} \approx 1$, но вследствие воздухоовлечения в бетонную смесь при вибрации и других факторов $k_{упл}$ часто составляет 0,96... 0,98.

В затвердевшем бетоне только часть воды находится в химически связанном состоянии. Остальная (свободная) вода остается в порах или испаряется. Поэтому затвердевший бетон никогда не бывает абсолютно плотным. Пористость (%) бетона можно определить по формуле

$$П = \frac{В - \omega Ц}{1000} 100, \quad (7.2)$$

где В и Ц — расходы воды и цемента, кг/м³ бетона; ω — содержание химически связанной воды, доли от массы цемента. Обычно для бетона в возрасте 28 сут принимают $\omega = 0,15$.

Относительная плотность бетона может быть повышена тщательным подбором зернового состава заполнителей, обеспечивающим меньший объем пустот в смеси заполнителей, а следовательно, и минимальное содержание цементного камня в бетоне. Кроме того, можно применять цементы, присоединяющие при гидратации возможно больше воды (высокопрочный портландцемент,

глиноземистый и расширяющиеся цементы), или цементы, занимающие больший абсолютный объем (пуццолановый портландцемент). Плотность бетона может быть повышена путем уменьшения водоцементного отношения, что, как уже говорилось, достигается введением в смесь специальных добавок — пластификаторов, уплотнением бетонной смеси вибрацией, центробежным или другим механизированным способом. Часть свободной воды из бетонной смеси можно при укладке удалить вакуумированием или прессованием.

Плотность бетона является его важнейшим свойством, в значительной степени определяющим прочность, непроницаемость и долговечность бетона.

§ 7.2. ПРОНИЦАЕМОСТЬ БЕТОНА

Для бетона гидротехнических и ряда других сооружений важной характеристикой является его проницаемость. Она в известной мере определяет способность материала сопротивляться воздействию увлажнения и замерзания, влиянию различных атмосферных факторов и агрессивных сред. Для практики наибольшее значение имеет водонепроницаемость бетона.

● *Проницаемость бетона зависит от его пористости, структуры пор и свойств вяжущего и заполнителей.* Бетон является капиллярно-пористым материалом, как бы пронизанным тончайшей сеткой пор и капилляров различных размеров. Мелкие поры и капилляры (микропоры) размером менее 10⁻⁵ см, к которым относятся, в частности, поры цементного геля, практически непроницаемы для воды. Микропоры и капилляры размером более 10⁻⁵ см доступны для фильтрации воды, которая происходит вследствие действия давления, градиента влажности или осмотического эффекта. Поэтому проницаемость бетона зависит от объема и распределения макропор и капилляров в бетоне.

Ориентировочно объем макропор $V_{мп}$ (%) можно вычислить по формуле

$$V_{мп} = \frac{В - 2\omega Ц}{1000} 100. \quad (7.3)$$

Объем макропор в бетоне колеблется от 0 до 40%. Макропористость бетона уменьшается при понижении В/Ц, увеличении степени гидратации цемента, уменьшении воздухоовлечения в бетонную смесь, применении химических добавок, уплотняющих структуру бетона.

Зависимость между проницаемостью и макропористостью показана на рис. 7.1. Так как макропористость зависит главным образом от водоцементного отношения, то можно построить зависимость проницаемости от В/Ц (рис. 7.2), которая более удобна для практического пользования. На практике возможно замет-

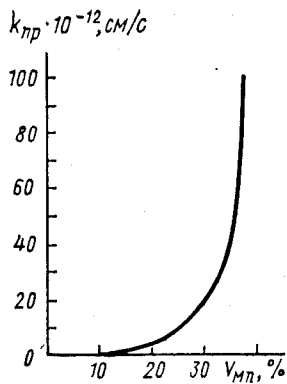


Рис. 7.1. Зависимость коэффициента проницаемости бетона $k_{пр}$ от объема макропор

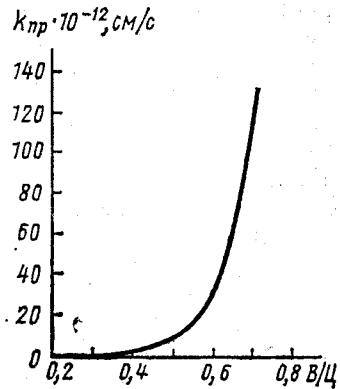


Рис. 7.2. Зависимость коэффициента проницаемости бетона $k_{пр}$ от В/Ц

ное отклонение от этой зависимости, так как при одинаковом В/Ц макропористость будет зависеть от вида и расхода цемента, степени уплотнения и ряда других факторов, которые окажут заметное влияние на проницаемость бетона.

При увлажнении бетона мельчайшие поры и капилляры заполняются водой, которая под действием физических поверхностных сил значительно теряет свою подвижность и как бы закупоривает эти капилляры. Наступает, как говорят, «кольматация» пор и капилляров, что приводит к уменьшению проницаемости бетона.

С увеличением возраста бетона изменяется характер его пористости, постепенно уменьшается объем макропор, которые как бы зарастают продуктами гидратации цемента, и в результате уменьшается проницаемость бетона (рис. 7.3).

Проницаемость бетона можно оценивать коэффициентом проницаемости, который измеряется количеством воды V , прошедшей через 1 см^2 образца в течение 1 ч при постоянном давлении:

$$k_{пр} = \frac{V}{At(p_1 - p_2)}, \quad (7.4)$$

где A — площадь образца; t — время; $(p_1 - p_2)$ — градиент давления.

Плотные бетоны обычно не фильтруют воду, поэтому для их оценки используют другое понятие — марка по водонепроницаемости, например W2, W4 и т. д. Эта характеристика определяется специальными испытаниями и показывает, до какого давления бетон является непроницаемым для воды.

При испытании с одной стороны образца, соприкасающегося с водой, создают давление, медленно его повышая. Наблюдая за

другой стороной образца, отмечают, при каком давлении на поверхности бетона появляются влажные пятна или отдельные капли воды. Это давление определяет марку бетона по водонепроницаемости.

Большое значение для повышения непроницаемости бетона имеют его однородность и сохранение сплошности материала в процессе его твердения и эксплуатации.

Появление микротрещин вследствие усадки бетона при попеременном увлажнении и замораживании или высыхании может существенно снизить непроницаемость бетона.

Рассмотренное выше справедливо и при воздействии на бетон других жидкостей: растворов солей и кислот, нефтепродуктов и т. д. В ряде случаев подобное воздействие может сопровождаться физико-химическими процессами взаимодействия цементного камня и заполнителя с проникающей жидкостью, что чаще всего приводит к постепенному повышению проницаемости бетона, но иногда при кольматации пор продуктами взаимодействия проницаемость бетона может уменьшиться.

Объем и характер пористости оказывают решающее влияние и на газопроницаемость бетона. Кольматация пор влагой или продуктами химических реакций существенно понижает газопроницаемость бетона. Газопроницаемость играет существенную роль при протекании процессов коррозии бетона и стали под воздействием атмосферных факторов (см. гл. 8).

Для повышения непроницаемости бетона применяют также специальные методы.

Методы и степень понижения проницаемости бетона

Введение при приготовлении бетона:	
органических и гидрофобных добавок	2...10
неорганических добавок	5...1000
загустевших веществ или термопластичных полимеров	10...500
Пропитка после изготовления специальными веществами	50...1000
Гидрофобизация поверхностных слоев бетона	2...10
Покрывание специальными пленкообразующими составами	10...100
Пропитка мономером с последующей полимеризацией	50...1000

Введение добавок или специальных веществ при приготовлении бетона является сравнительно простым и достаточно эффективным мероприятием. Известно много добавок, применяемых для этих целей. Хорошо зарекомендовали себя добавки типа ГКЖ, различные поверхностно-активные вещества, водорастворимые

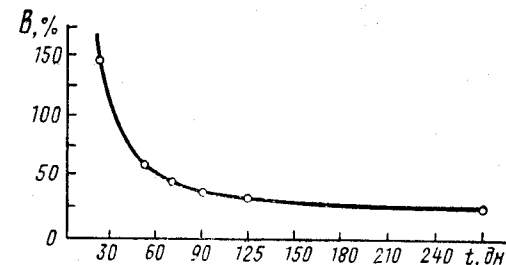


Рис. 7.3. Влияние возраста бетона на его водонепроницаемость V (за 100 % принята водонепроницаемость в возрасте 30 сут)

смолы, некоторые латексы, эмульсии (например, битумные эмульсии) и суспензии. Иногда применяют тонкомолотые порошки полимеров или подобных веществ, например пека. После затвердевания бетона его нагревают, полимерные материалы размягчаются и кольматируют поры бетона, снижая его проницаемость. Среди неорганических добавок получили распространение хлорное железо, алюминат натрия, жидкое стекло и др. Способствует повышению непроницаемости бетона введение тонкомолотых добавок. Хорошие результаты получают при применении комплексных добавок или специальных вяжущих веществ, обеспечивающих получение расширяющихся или безусадочных растворов.

Проницаемость затвердевшего бетона может быть существенно уменьшена путем его пропитки петролатумом, жидким стеклом, серой, парафином и другими веществами, кольматирующими поры и капилляры бетона. Особенно эффективной является пропитка бетона мономерами или составами на их основе с последующей полимеризацией пропитываемого вещества в теле бетона. Практически непроницаемыми являются полимербетоны.

§ 7.3. МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА

● Под морозостойкостью бетона понимают его способность в насыщенной водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание. Основной причиной, вызывающей разрушение бетона в этих условиях, является давление на стенки пор и устья микротрещин, создаваемое замерзающей водой. При замерзании вода увеличивается в объеме более чем на 9%. Расширению воды препятствует твердый скелет бетона, в котором могут возникать очень высокие напряжения. Повторяемость заморозания и оттаивания приводит к постепенному разрушению структуры бетона и к его разрушению. Сначала начинают рушиться выступающие грани, затем поверхностные слои и постепенно разрушение распространяется в глубь бетона. Некоторое влияние будут оказывать и напряжения, вызываемые различием в коэффициентах температурного расширения составляющих бетона и температурно-влажностным градиентом.

Для определения морозостойкости бетона применяют метод попеременного замораживания и оттаивания. Методика испытаний, в частности температура замораживания, условия водонасыщения и размеры образца, продолжительность цикла, оказывает заметное влияние на показатели морозостойкости бетона. С понижением температуры заморозания, а особенно при замораживании в воде или в растворах солей, бетон разрушается быстрее.

Критерием морозостойкости бетона является количество циклов, при котором потеря в массе образца менее 5%, а его прочность снижается не более чем на 25%. Это количество циклов определяет марку бетона по морозостойкости: для тяжелого бетона

F50 ... F500, которая назначается в зависимости от условий эксплуатации конструкции.

Морозостойкость бетона зависит от его строения, особенно от характера пористости, так как последний будет определять объем и распределение льда, образующегося в теле бетона при отрицательных температурах, и, следовательно, значение возникающих напряжений и интенсивность протекания процесса ослабления структуры бетона.

В микропорах бетона размером 10^{-5} см обычно содержится связанная вода, которая не переходит в лед даже при очень низких температурах (до -70°C), поэтому микропоры не оказывают заметного влияния на морозостойкость бетона. Последняя главным образом зависит от объема макропор в бетоне и от их строения.

■ Существует два различных способа повышения морозостойкости бетона: 1) повышение плотности бетона, уменьшение объема макропор и их проницаемости для воды, например за счет снижения В/Ц, применения добавок, гидрофобизирующих стенки пор, или кольматации пор пропиткой специальными составами; 2) создание в бетоне с помощью специальных воздухововлекающих добавок резервного объема воздушных пор (более 20% от объема замерзающей воды), не заполняемых при обычном водонасыщении бетона, но доступных для проникания воды под давлением, возникающим при ее замерзании. Зависимость морозостойкости от водоцементного отношения приведена на рис. 7.4. Обычно для получения достаточно морозостойкого бетона В/Ц должно быть менее 0,5.

Весьма эффективным и сравнительно простым повышением морозостойкости является применение воздухововлекающих добавок.

Для получения морозостойкого бетона необходимо, чтобы расстояние между пузырьками воздуха, т. е. толщина прослоек между соседними воздушными порами, не превышало 0,025 см. Поэтому для надлежащего эффекта необходимо обеспечить не только определенный объем воздухововлечения, но и получение воздушных пор возможно меньшего размера, так как это позволяет уменьшить их общий объем и способствует повышению морозостойкости бетона при наименьшем снижении его прочности вследствие воздухововлечения. Обычно в бетоне с воздухововлекающими добавками удельная поверхность пор, характеризующая их

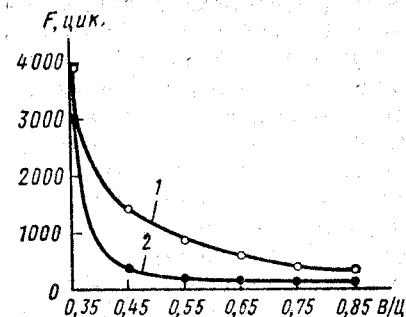


Рис. 7.4. Зависимость морозостойкости F обычного бетона 1 и бетона с вовлеченным воздухом 2 от В/Ц

размеры, составляет 1000...2000 см²/см³, размер пор — 0,005...0,1 см, а расстояние между ними не превышает 0,025 см.

Оптимальный объем вовлеченного воздуха составляет 4...6% и определяется расходом цемента, воды и крупного заполнителя. Объем увеличивается при понижении крупности заполнителя и повышении расхода цемента и воды.

ГЛАВА 8

КОРРОЗИЯ БЕТОНА И МЕРЫ БОРЬБЫ С НЕЙ

§ 8.1. ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН

На бетонные и железобетонные конструкции, эксплуатируемые в промышленных, гражданских, жилых, сельскохозяйственных зданиях, могут действовать агрессивные среды. Долговечность конструкций определяется стойкостью как бетона, так и арматуры при воздействии на них агрессивной среды.

■ Степень агрессивного воздействия на бетонные и железобетонные конструкции определяется: для жидких сред — наличием и концентрацией агрессивных агентов, температурой, величиной напора или скоростью движения жидкости у поверхности; для газовых сред — видом и концентрацией газов, растворимостью их в воде, влажностью и температурой среды; для твердых тел (соли, аэрозоли, пыли) — дисперсностью, растворимостью в воде, влажностью окружающей среды. Степень их агрессивного воздействия на бетон определяется специальными нормами по антикоррозионной защите строительных конструкций (СНиП 2.03.11—85). В зависимости от глубины разрушения бетона при коррозии различают слабо-, средне- и сильноагрессивные среды (табл. 8.1).

При воздействии на бетон воды-среды может происходить разрушение бетона, характеризующееся I, II или III видом коррозии. Разрушение конструкции в данном случае наступает вследствие недостаточной стойкости бетона. При проектировании конструкции необходимо учитывать состав агрессивной среды, условия службы конструкции, правильно выбрать материалы и назначить плотность бетона, чтобы обеспечить заданную долговечность конструкции.

Таблица 8.1. Допустимая глубина (см) разрушения бетона за 50 лет эксплуатации

Степень агрессивности воды-среды	Конструкции	
	железобетонные	бетонные
Неагрессивная	1	2
Слабоагрессивная	1...2	2...4
Среднеагрессивная	2...4	4...6
Сильноагрессивная	Более 4	Более 6

В железобетонных конструкциях необходимо рассматривать также вопрос сохранности арматуры в бетоне. При воздействии на бетон жидких сред, не содержащих агрессивных по отношению к стали ионов (Cl⁻, SO₄²⁻ и др.), в первую очередь разрушается бетон, т. е. процесс коррозии бетона является ведущим. В условиях газовой среды (при повышении относительной влажности воздуха 60%), а также при воздействии на конструкцию жидких или твердых сред, содержащих агрессивные по отношению к стали ионы (например, Cl⁻), возможно развитие коррозии арматуры. Разрушение железобетонной конструкции в данном случае может наступить вследствие коррозии арматуры. Продукты ржавчины накапливаются на арматуре, давят на бетон, вызывают появление трещин, а затем и отслоение защитного слоя. Наибольшую опасность вызывает применение высокопрочных арматурных сталей, подверженных коррозионному растрескиванию. В этом случае возможен обрыв напряженной арматуры.

Коррозия бетона в газообразной среде протекает, как правило, при наличии влаги, и возникающие при этом процессы не отличаются практически от коррозии бетона в водной среде.

Для того чтобы подробнее ознакомиться с причинами разрушения конструкций, необходимо рассмотреть процессы, происходящие в бетоне и на арматуре при воздействии на конструкцию агрессивной среды.

§ 8.2. ВИДЫ КОРРОЗИИ БЕТОНА В ЖИДКОЙ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ

В 1952 г. В. М. Москвиним была предложена классификация основных видов коррозии. На основе полученных экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации многочисленных процессов, протекающие при коррозии бетона, были разделены на три основных вида, в пределах каждого из которых процессы коррозии объясняются основными ведущими признаками.

■ В коррозии I вида объединены все те процессы коррозии, которые возникают в бетоне при действии мягких вод, когда составные части цементного камня растворяются и уносятся протекающей водой. Особое развитие коррозия бетона I вида получает при фильтрации воды через бетон.

■ К коррозии II вида относятся те процессы коррозии, которые развиваются в бетоне при действии вод, содержащих химические вещества, вступающие в реакцию с составляющими цементного камня. Продукты реакции при этом либо легко растворяются и уносятся водой, либо в виде аморфной массы, не обладающей вяжущими свойствами, остаются на месте реакции. К этой группе относятся процессы, возникающие при действии кислот, магnezальных солей.

■ К коррозии III вида относятся те процессы коррозии, при развитии которых в порах и капиллярах бетона происходит нако-

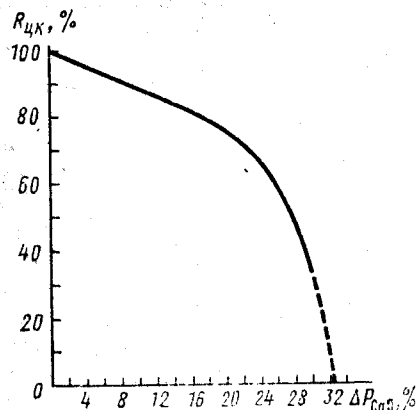


Рис. 8.1. Снижение прочности цементного камня $R_{цк}$ при выщелачивании (ΔP_{CaO} — потеря CaO, %)

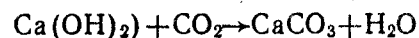
пление малорастворимых солей, кристаллизация которых вызывает возникновение значительных напряжений в стенках пор и капилляров и приводит к разрушению структурных элементов бетона. Сюда могут быть отнесены процессы коррозии при действии сульфатов, когда разрушение бетона вызывается ростом кристаллов гидросульфата алюмината кальция.

В естественных условиях редко встречается один вид коррозии и один из них является ведущим.

Коррозия I вида наиболее опасна в тонкостенных конструкциях и конструкциях, работающих под напором воды, когда составные

части цементного камня могут растворяться и вымываться водой. Наличие в воде солей, не вступающих в реакцию с цементным камнем, увеличивает растворимость продуктов гидратации цементного клинкера и ускоряет процесс коррозии. Наиболее легко растворимым продуктом гидратации цемента является гидроксид кальция, выщелачивание которого ведет к гидролизу цементного клинкера. В первую очередь происходит разрушение многоосновных соединений типа трехкальциевого и двухкальциевого гидросиликатов, а затем уже низкоосновных соединений (например, $CaO \cdot SiO_2 \cdot ag$). Из гидроалюминатов менее стойким является четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF .

Выщелачивание гидроксида кальция из бетона приводит к потере прочности растворной части бетона (рис. 8.1). При потере бетоном 33% CaO наступает его разрушение. Скорость коррозии прямо пропорциональна скорости течения воды, омывающей бетон, но до определенных пределов. При больших скоростях течения воды рост интенсивности выщелачивания уже больше зависит от скорости отвода CaO с поверхности бетона. Существенное влияние на протекание процессов коррозии I вида оказывает химический состав воды-среды. Присутствие в воде солей, даже не вступающих в реакцию с элементами цементного камня, но повышающих ионную силу раствора, увеличивает выщелачивание CaO. Присутствие в растворе солей кальция ($CaHCO_3$, $CaCO_3$) снижает скорость выщелачивания, поэтому карбонизация бетона



будет способствовать уменьшению скорости развития коррозии I вида.

Стойкость бетона против коррозии I вида зависит также от химического состава применяемых цементов. Преобладание в портландцементе высокоосновных соединений (алита C_3S , белита C_2S) понижает стойкость цементного камня в том случае, если разрушение идет за счет растворения его составных частей, т. е. в раствор переходит большое количество CaO.

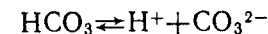
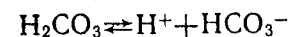
Стойкость бетона может быть повышена путем введения в цемент активной гидравлической добавки (трепела, грасса и др.), которая способна связывать $Ca(OH)_2$ в нерастворимые соединения, уменьшая тем самым степень выщелачивания CaO. Кроме того, добавки снижают водонепроницаемость бетона. Необходимо отметить, что пуццолановый портландцемент будет более стойким при коррозии I вида только в том случае, если исключено совместное действие мороза и воды.

■ Для повышения стойкости бетона при коррозии I вида используют: 1) бетоны повышенной плотности; 2) естественную или искусственную карбонизацию поверхностного слоя бетона; 3) специальные цементы, в частности пуццолановые; 4) гидроизоляция поверхности бетона; 5) облицовку или пропитку бетона, и т. д.

При коррозии II вида последовательность разрушения бетона отсутствует. В поверхностных слоях бетона, соприкасающихся с внешней средой, идет разрушение структурных элементов гидратированного цементного камня, а иногда и негидратированных зерен цементного клинкера. Новообразования не обладают вяжущими свойствами и достаточной плотностью, чтобы воспрепятствовать дальнейшему проникновению агрессивной среды. Они смываются, растворяются и обнажают более глубокие слои бетона.

Наиболее часто встречающаяся при действии природных вод коррозия бетона — коррозия под действием углекислых вод. Углекислота H_2CO_3 присутствует, как правило, во всех водах. Источником обогащения воды углекислотой являются биохимические процессы, протекающие в воде и в почве.

Углекислота имеет две степени диссоциации:



Увеличение в растворе ионов водорода H^+ смещает равновесие реакции, при этом $HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3$, а $CO_3^{2-} \rightarrow HCO_3^-$. Уменьшение ионов водорода приводит, наоборот, к образованию HCO_3^- и CO_3^{2-} из углекислоты. Для различных pH раствора характерны разные основные формы: при $pH > 8,4$ углекислота H_2CO_3 в воде отсутствует, при $pH < 6,5$ H_2CO_3 является основной формой, при $pH < 4,0$ HCO_3^- отсутствует; при $pH > 6,5$ HCO_3^- — основная форма

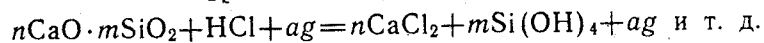
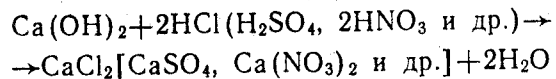
ма, при $pH > 11$ CO_3^{2-} — основная форма. Для устойчивого состояния HCO_3^- в растворе необходимо наличие некоторого количества CO_2 . Вода, в которой H^+ , CO_3^- и HCO_3^- находятся в равновесном состоянии, не способна растворять карбонатную пленку, т. е. по отношению к цементному камню она не агрессивна. Увеличение CO_2 сверх равновесного создает условия для растворения карбонатной пленки, т. е. вода приобретает агрессивные свойства по отношению к цементному камню бетона.

Присутствие в растворе ионов (Cl^- , Na^+ и др.), не участвующих в реакции, увеличивает ионную силу раствора, ускоряет реакцию, способствуя растворению большого количества $CaHCO_3$. В том случае, если на бетон действует стоячая или медленно движущаяся вода, на поверхности бетона устанавливается карбонатное равновесие, т. е. разрушение замедляется. При быстром течении воды замедление реакции вызывается уменьшением реагирующих поверхностей, уменьшение ионов OH^- в растворе способствует переводу $CaHCO_3$ в $CaCO_3$, который выпадает в осадок. Чем выше концентрация OH^- внутри цементного камня, тем выше скорость его разрушения при быстром обмене агрессивной воды у поверхности.

Отсюда можно заключить, что вначале скорость разрушения цементного камня на портландцементе и пуццолановом портландцементе будет одинаковая, но затем она у цементного камня на пуццолановом цементе значительно уменьшается, так как количество гидроксильных ионов (OH^-) в жидкой фазе там значительно меньше. По этой же причине более высокую стойкость при коррозии II вида будет иметь бетон на глиноземистом цементе. При этом существенную роль играет плотность бетона и продуктов коррозии.

Подводя итог процесса, протекающего при углекислотной коррозии, необходимо отметить, что чем больше агрессивной H_2CO_3 , тем выше кислотные свойства раствора и скорость коррозии.

Действие на бетон неорганических кислот также вызывает в бетоне процессы коррозии II вида, которые могут переходить в коррозию I вида, вызывая полное разрушение цементного камня бетона:

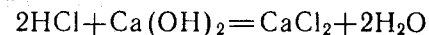


В зависимости от вида кислоты в процессе реакции образуются различные соли. Скорость разрушения цементного камня будет зависеть от растворимости солей кальция. При большой растворимости продуктов реакции быстрее протекает разрушение цементного камня. Скорость коррозии в этом случае ограничивается реакционной емкостью агрессивной среды, скоростью ее обмена

на поверхности бетона и размером поверхности соприкосновения среды и цементного камня. Если продукты реакции малорастворимы, то, оставаясь на месте реакции, т. е. на поверхности бетона, они закрывают доступ агрессивной среды к внутренним слоям цементного камня, замедляя скорость коррозии.

Существенную роль в развитии процесса коррозии бетона II вида играет скорость обмена раствора у поверхности цементного камня.

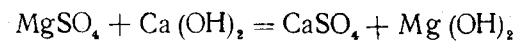
При малых скоростях бетона и малых концентрациях кислот ($pH > 4$) взаимодействие кислоты с гидроксидом кальция протекает полностью:



После этого раствор нейтрализуется, происходит растворение $Ca(OH)_2$, образуется $CaCO_3$ и далее процесс коррозии II вида сменяется процессом коррозии I вида. При больших скоростях ограничивающими факторами скорости коррозии являются размер поверхности соприкосновения агрессивного раствора и цементного камня и скорость притока агрессивной среды. Цементы по стойкости в кислотах малых концентраций можно расположить в следующем порядке: глиноземистый, пуццолановый, портландцемент, что аналогично коррозии I вида. Это связано с тем, что процесс коррозии II вида протекает вместе с процессом коррозии I вида и последнему в этом случае принадлежит ведущая роль. При повышении концентрации кислот разница в стойкости цементов становится практически неощутимой. В этом случае стойким считается специальный кислотоупорный цемент.

■ Защитными мероприятиями для бетона в этом случае являются выбор специального вяжущего и надежная изоляция поверхности в виде покрасок, облицовок и т. д.

Ко II виду коррозии бетона относится также действие магнезиальных солей на бетон. Соли магния $MgSO_4$ и $MgCl_2$, как правило, присутствуют в грунтовых водах. Большое количество этих солей содержится и в морской воде. При действии таких солей на бетон происходит взаимодействие с гидроксидом кальция:



или



При малых концентрациях раствора $MgCl_2$ реакционная емкость раствора низкая. Реакции с $Ca(OH)_2$ протекают на поверхности бетона. Выделяющийся при этом $Mg(OH)_2$ образует на поверхности бетона пленку, которая даже способствует предохране-

нию бетона от дальнейшего разрушения, т. е. при малых концентрациях растворов скорость диффузии $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из внутренних слоев бетона достаточна, чтобы восполнить то количество, которое ушло на реакцию с солями. При длительном взаимодействии с такими растворами во внутренних слоях бетона развивается коррозия I вида [вынос $\text{Ca}(\text{OH})_2$]. При больших концентрациях MgCl_2 реакционная емкость раствора велика, количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ недостаточно для нейтрализации, поэтому раствор диффундирует внутрь бетона.

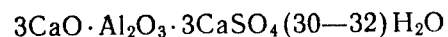
При действии MgSO_4 на бетон «критическая» концентрация определяется соотношением между суммарной поверхностью взаимодействия цементного камня и количеством раствора. Если время соприкосновения раствора MgSO_4 с поверхностью цементного камня больше времени полного насыщения этого объема сульфатом кальция (CaSO_4), то гипс выпадает в осадок. В противном случае в твердой фазе будет образовываться $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Образование CaSO_4 — это уже процесс коррозии III вида, который будет рассмотрен дальше.

Так как взаимодействие магниевых солей с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ связано с его уносом из бетона и проникновением в глубь солей, которые способны вызвать дальнейшее разрушение бетона, то цемент с большим запасом CaO более стоек в данных условиях.

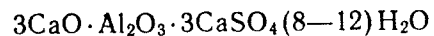
Опыты показали, что при концентрации растворов солей до 5% стойкость портландцемента и пуццоланового портландцемента практически одинакова, при дальнейшем увеличении концентрации наиболее стойки бетоны на портландцементе. Высокой стойкостью обладают также цементы, в которых отсутствует $\text{Ca}(\text{OH})_2$, вступающий в обменные реакции с солями магния, например глиноземистый цемент.

Для защиты бетона от коррозии II вида используют следующие приемы: правильный выбор цемента; повышение плотности бетона; защита поверхности бетона специальными красками, облицовкой и другие защитные мероприятия [65].

III вид коррозии характеризуется образованием в порах и капиллярах бетона малорастворимых солей, вызывающих значительные напряжения, способствующие разрушению структуры бетона. Такими продуктами при воздействии сульфатов на бетон являются гипс и гидросульфат алюмината кальция, встречающийся в двух модификациях:



и



При коррозии III вида в начальных стадиях идет уплотнение бетона за счет кристаллических новообразований солей. В плотном бетоне пополнение солей идет медленнее, процесс коррозии

можно распознать иногда через несколько лет. В пористом бетоне процесс протекает интенсивнее и через несколько недель или месяцев проявляется в полную силу.

Микро- и макропористость, наличие открытых пор играют большую роль в развитии процесса коррозии III вида, но не меньшее значение имеет размер поверхности соприкосновения цементного камня с агрессивной средой и, конечно, их химический состав. Воды, содержащие сульфаты, встречаются всюду. В пресных озерах и реках SO_4^{2-} около 60 мг/л, редко встречаются воды с содержанием SO_4^{2-} до 100 мг/л, это в основном минерализованные воды. В морской воде с содержанием соли 33...35 г/л количество SO_4^{2-} составляет 2500...2700 мг/л. В природных водах содержание SO_4^{2-} обусловлено растворением сернокислых Ca , Na , Mg .

Наличие сульфатов в воде повышает растворимость составляющих цементного камня, тем самым форсируя коррозию I вида, и вызывает обменную реакцию — коррозию II вида. При определенных условиях развивается коррозия III вида.

При соприкосновении воды, содержащей сульфаты $\text{CaSO}_4 > 2100$ мг/л, с бетоном происходит насыщение последнего и образуется $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Из числа комплексных солей, образующихся в бетоне, наибольшую опасность представляет гидросульфат алюмината кальция (ГСАК), присоединяющий 30...32 молекулы воды и при этом значительно увеличивающийся в объеме. В образовании этой соли принимают участие гидроалюминаты цементного камня и гипс, поступивший в виде раствора или образовавшийся в результате реакции между сульфатами и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Чем выше концентрация SO_4^{2-} в растворе и больше C_3A (трехкальцевого алюмината) в цементе, тем благоприятнее условие для образования гидросульфат алюмината кальция.

При концентрации $\text{SO}_4^{2-} > 2500$ мг/л будет образовываться ГСАК, оказывающий влияние на свойства бетона. Полнота прохождения реакции образования ГСАК зависит от наличия в растворе избытка гидроалюмината кальция ($\text{C}_3\text{A} \cdot aq$), т. е. от $\text{SO}_4^{2-}/\text{C}_3\text{A} = 1,04$. Если C_3A меньше требуемой величины, то количество ГСАК будет ограничиваться присутствием C_3A у места реакции, если C_3A больше требуемой величины, то количество ГСАК будет лимитироваться количеством ионов SO_4^{2-} у места реакции.

Присутствие в растворе солей (NaCl , NaNO_3 , KCl и др.), не принимающих участия в реакции с составляющими ГСАК, повышает ионную силу раствора, а следовательно, и растворимость реагирующих веществ и продуктов реакции, т. е. препятствует образованию и росту ГСАК. Как уже отмечалось, образование и последующая кристаллизация ГСАК с 30...32 H_2O связаны со значительным увеличением объема твердой фазы. При участии в ре-

акции C_3A увеличение объема происходит приблизительно в 1,63, а при участии C_3A и $Ca(OH)_2$ — в 2,27 раза.

При коррозии III вида вначале на поверхности бетона образуется тонкая пленка из кристаллов гипса, а затем происходит постепенное образование скоплений кристаллов гипса и ГСАК в виде прожилок в более глубоких слоях цементного камня.

Скопление гипса возникает, как правило, в местах скоплений $Ca(OH)_2$. Образовавшиеся кристаллы гипса в ГСАК оказывают большое давление на стенки пор цементного камня и вызывают местные разрушения, т. е. образование трещин, параллельных поверхности. С образования этих трещин начинается постепенное разрушение бетона.

Значительное обводнение бетона приводит к растворению $Ca(OH)_2$ и $CaSO_4$, уменьшая возникающие напряжения, но может способствовать разрушению бетона вследствие вымывания $Ca(OH)_2$ и продуктов коррозии. В этом случае к коррозии III вида добавляется коррозия I вида. Так как содержание в твердеющем цементе $Ca(OH)_2$ оказывает влияние на химические процессы коррозии III вида и степень расширения новообразований, то цементы с разным минералогическим составом будут обладать различной стойкостью в этих условиях. Алитоалюминатные цементы имеют меньшую стойкость по сравнению с белитовыми цементами.

Наибольшей стойкостью при коррозии III вида обладают бетоны на глиноземистом цементе. Высокой стойкостью отличается пуццолановый портландцемент. Уменьшенное содержание в нем $Ca(OH)_2$ делает невозможным образование и существование многоосновных гидроалюминатов, что препятствует, а иногда исключает возможность образования ГСАК.

Основными мероприятиями по борьбе с коррозией бетона III вида являются: выбор цемента в зависимости от условий службы конструкций и степени агрессивности среды; введение воздуховывлекающих, пластифицирующих и повышающих растворимость $Ca(OH)_2$ и $CaSO_4$ добавок типа $CaCl_2$, СНВ, СДБ, кремнийорганических; повышение плотности бетона различными способами, в том числе применением низких В/Ц и уплотняющих добавок.

Если указанные средства не могут обеспечить защиту, то необходимо прекратить доступ воды к поверхности бетона, т. е. применить поверхностную защиту. Эффективность различных мероприятий по повышению долговечности бетона при воздействии на него агрессивной среды проверяется опытным путем в лаборатории.

При моделировании процессов коррозии бетона в лабораторных условиях необходимо соблюдать равенство параметров, определяющих скорость коррозии бетона.

§ 8.3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА ПРИ КОРРОЗИИ

При коррозии I и II видов происходит постепенное разрушение бетона с поверхности в глубину материала. Для оценки долговечности бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды, важное значение имеет оценка глубины разрушения бетона.

Интенсивность разрушения бетона зависит от механизма переноса агрессивных сред и их взаимодействия с компонентами бетона, главным образом цементным камнем, который в большинстве случаев является наиболее слабым с точки зрения коррозии компонентом бетона.

Для развития процессов коррозии необходимо постоянное воздействие агрессивной среды на компоненты бетона, в том числе на внутренние слои, когда граница коррозии перемещается в глубь материала. В процессе коррозии бетона имеют место различные механизмы переноса агрессивных веществ к поверхности коррозии. В ненапорных подземных и подводных конструкциях, а также в водонасыщенных наземных конструкциях преобладает диффузионный перенос агрессивных веществ. Это наиболее распространенный случай при коррозии бетона. При одностороннем напоре, температурном или влажностном перепадах или капиллярном подсосе имеется фильтрационный механизм переноса агрессивных сред.

Скорость коррозии бетона обычно быстро развивается в первоначальный период и постепенно затухает во времени. Изменение скорости коррозии связано с образованием на реакционной поверхности продуктов коррозии, которые тормозят доступ к ней агрессивных веществ. В первое время скорость коррозии определяется скоростью взаимодействия агрессивной среды с компонентами бетона или скоростью растворения. Однако очень быстро на реакционной поверхности появляются продукты коррозии и на скорость коррозии начинает влиять также диффузия агрессивных сред к реакционной поверхности. В этот период, условно названный диффузионно-кинетическим, скорость коррозии определяется как скоростью химического взаимодействия, так и диффузией реагирующих веществ [64].

С увеличением глубины поражения бетона и величины слоя продуктов коррозии решающее значение приобретает диффузия агрессивных веществ к поверхности коррозии. Этот период называют периодом внутренней диффузии, и для него характерна прямая зависимость глубины разрушения от \sqrt{t} (t — время воздействия агрессивных сред на бетон) (рис. 8.2).

Длительность процесса коррозии бетона в диффузионно-кинетическом периоде колеблется от 6 до 60 сут в зависимости от состава бетона, вида агрессивной среды, фазового состава, струк-

Таблица 8.2. Продукты коррозии в твердой фазе

Вид коррозии	Агрессивность воды-среды	Продукты коррозии			
		обязательные		возможные	
		гель	кристаллы	гель	кристаллы
I	Выщелачивающая	$m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	—	—	—
		$\text{Al}(\text{OH})_3$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$	—	—	—
II	Общекислотная	$m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	—	$\text{Al}_3(\text{OH})_3$	Соли Ca, Al, Fe
		$m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	—	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Соли Ca, Al, Fe
	Магнезиальная	$m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	—	—	—
		$\text{Al}(\text{OH})_3$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$	—	—	—
Углекислая	$m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	CaCO_3	—	—	
	$\text{Al}(\text{OH})_3$ $\text{Fe}(\text{OH})_3$	—	—	—	
III	Щелочная	—	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	—	
	Сульфатная	—	Гидросульфатоалюминаты кальция	Гипс	

туры и толщины слоя продуктов коррозии. Продукты коррозии могут состоять из геля (одно- или многокомпонентного), геля и кристаллов, в основном солей кальция, или из кристаллов, например гидросульфатоалюмината кальция и гипса (табл. 8.2).

Диффузионное сопротивление продуктов коррозии определяется структурой кристаллической составляющей и повышается с увеличением плотности слоя продуктов коррозии. Наименьшим сопротивлением обладают продукты коррозии гелевого строения.

Толщина слоя продуктов коррозии зависит от условия эксплуатации и способности продуктов коррозии удерживаться в порах бетона или на его поверхности. При свободном омывании конструкции водой-средой толщина слоя продуктов коррозии обычно устанавливается постоянной, так как часть продуктов коррозии смывается и уносится водой. В этом случае процесс коррозии может протекать как по диффузионно-кинетическому, так и по диффузионному механизму переноса вещества.

На конструкциях, находящихся в грунтах, продукты коррозии,

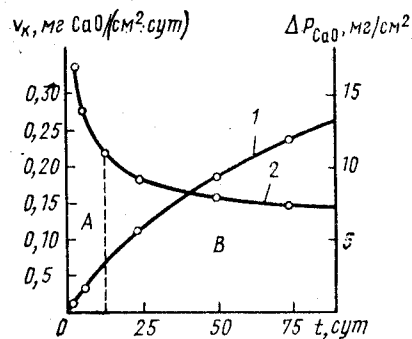


Рис. 8.2. Основные кинетические зависимости коррозии I и II видов: 1 — количество разрушенного бетона, определяемое по потере бетоном CaO (P_{CaO}); 2 — скорость коррозии бетона v_k ; А — диффузионно-кинетический период; В — период внутренней диффузии

как правило, остаются на месте образования. При этом происходит постепенное увеличение толщины слоя продуктов коррозии и повышение его плотности. В этих условиях скорость реакции коррозии и глубина разрушения бетона определяются диффузией реагирующих веществ и степеню их агрессивности. Влияние вида агрессивной среды на скорость коррозии бетона показано на рис. 8.3. При воздействии различных агрессивных веществ скорость коррозии при диффузионном механизме их переноса является прямолинейной зависимостью от \sqrt{t} (где t — время испытания).

В цементном камне или бетоне происходит при воздействии агрессивной среды послойное разрушение материала с образованием следующих зон (рис. 8.4): продуктов коррозии, непосредственно коррозии и бетона, в котором не произошло каких-либо фазовых превращений. С течением времени происходит постепенное передвижение зон в глубину бетона, но даже при значительной степени разрушения материала сохраняется четкая граница между доброкачественным бетоном и зонами коррозии.

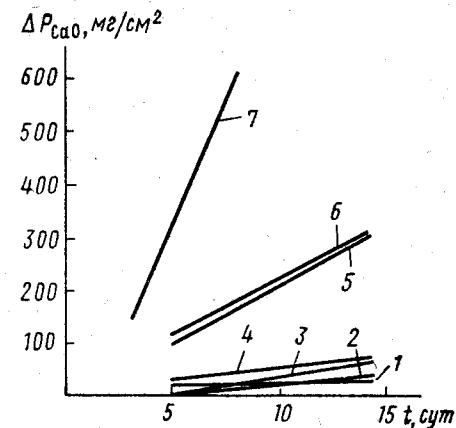


Рис. 8.3. Кинетическая зависимость процессов коррозии цементного камня в диффузионном периоде $P_{\text{CaO}} = j(\sqrt{t})$: 1 — 0,1 н. раствор $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$; 2 — дистиллированная вода; 3 — агрессивная CO_2 — 300 мг/л; 4 — 0,1н. HF; 5 — 0,1 н. H_2SO_4 ; 6 — 0,1 н. HCl (бетон); 7 — 0,1 н. HCl

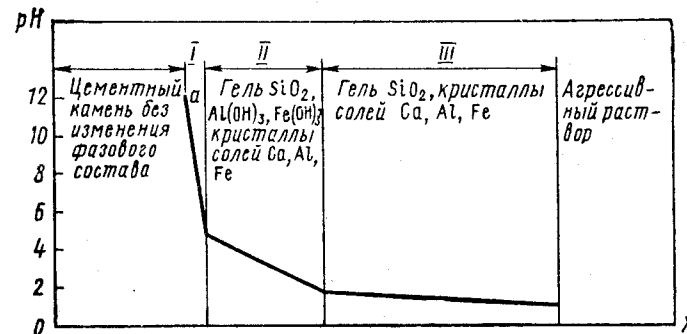


Рис. 8.4. Состав твердой фазы и pH в различных зонах цементного камня при действии на него кислотных агрессивных сред: I — зона коррозии; II — зона вторичных химических реакций; III — зона полностью разрушенного цементного камня

В настоящее время еще не разработаны способы, которые позволяли бы надежно определять глубину разрушения бетона при коррозии на основе данных о его составе и условий агрессивного воздействия. Существующие методы прогнозирования глубины коррозии бетона основываются на проведении предварительных испытаний, по результатам которых с учетом закономерностей развития процесса коррозии при длительных сроках воздействия, когда определяющим является диффузионный перенос реагирующих веществ, определяется глубина коррозии бетона через заданный промежуток времени.

Глубина разрушения бетона к определенному сроку испытаний

$$h = \frac{P_{CaO}}{\Psi P'_{CaO}} 10^{-5}, \quad (8.1)$$

где P_{CaO} — количество прореагировавшего цементного камня в пересчете на CaO, отнесенное к единице реагирующей поверхности образцов, г/см²; Ψ — расход цемента в бетоне, кг/м³; P'_{CaO} — содержание CaO в цементе (по данным химического анализа), %.

Чтобы установить зависимость $P_{CaO} = f(\sqrt{t})$, предварительным испытаниями 6...8 раз определяют значения P_{CaO} . опыты проводят на материалах и средах, для которых делают прогнозирование. Необходимо заметить, что в бетонах на плотных заполнителях, стойких к действию агрессивных сред, глубина коррозии резко уменьшается не только вследствие сокращения объема цементного камня, но также за счет повышения общей плотности материала, отложения продуктов коррозии в порах бетона и на поверхности заполнителя с возможным постепенным уплотнением порового пространства бетона, что затрудняет доступ агрессивной среды к реакционной поверхности.

Для прогнозирования глубины разрушения бетона в диффузионный период, что чаще встречается на практике, используют формулу

$$h_1 = (k \sqrt{t} - a) / (\Psi P'_{CaO}), \quad (8.2)$$

где k — экспериментальный коэффициент, представляющий собой тангенс угла наклона кривых коррозии в диффузионный период к оси абсцисс (рис. 8.3) и определяемый предварительными испытаниями; t — время, для которого прогнозируется глубина разрушения, сут; a — поправочный коэффициент, учитывающий, что первоначальный период коррозии проходит по диффузионно-кинетическому механизму и опытные прямые $P_{CaO} = f(\sqrt{t})$ пересекают ось ординат в точке, координата которой отлична от 0.

Коэффициент

$$k = \Delta y / \Delta x = (P_{1CaO} - P_{2CaO}) / (\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}), \quad (8.3)$$

где P_{1CaO} и $\sqrt{t_1}$ — координаты двух точек на опытной кривой коррозии, построенной в координатах $P_{CaO} = f(\sqrt{t})$.

Поправочный коэффициент

$$a = k \sqrt{t_1} - P_{1CaO}. \quad (8.4)$$

Ориентировочное определение глубины коррозии, если для нее характерен диффузионно-кинетический механизм переноса веществ, производят по формуле

$$h_1 = (v_{CaO} t) / (\Psi P'_{CaO}), \quad (8.5)$$

где v_{CaO} — постоянная скорость коррозии при диффузионно-кинетическом механизме переноса веществ, определяемая опытным путем, г/(см²·сут).

Пример 8.1. Определить глубину коррозии бетона через 20 лет, приготовленного на цементе с содержанием 60% CaO, при расходе цемента 350 кг/м³. Испытания показали, что в возрасте 1 мес $P_{CaO} = 0,1$ г/см², а в возрасте 2 мес — 0,16 г/см².

$$k = (0,16 - 0,1) / (\sqrt{60} - \sqrt{30}) = 0,05 / 2,2 = 2,27 \cdot 10^{-3} \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут}^{1/2});$$

$$a = 2,27 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{30} - 0,1 = 0,025 \text{ г}/\text{см}^2;$$

$$h_1 = \frac{2,27 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{7300} - 0,025}{350 \cdot 60} \cdot 10^{-3} = 9 \text{ см.}$$

В действительности нельзя допускать значительного разрушения бетона под действием агрессивных сред. Если прогнозируемая глубина разрушения через 50 лет превосходит 1...3 см, следует применять специальные меры защиты: окраску специальными составами, пропитку поверхности, кислотоупорные бетоны и полимербетоны (см. гл. 14).

§ 8.4. КОРРОЗИЯ АРМАТУРЫ В БЕТОНЕ

■ Защитное действие бетона по отношению к арматуре определяется способностью цементного камня пассивировать сталь. Известно, что в подавляющем большинстве случаев коррозия металлов происходит по электрохимическому механизму, для осуществления которого необходимы следующие условия: 1) наличие разности потенциалов на поверхности металла; 2) наличие электролитической связи между участками поверхности металла с различными потенциалами; 3) активное состояние поверхности металла по реакции $nH_2O + Me \rightarrow Me^+ \cdot nH_2O \cdot e^-$; 4) наличие достаточного количества деполаризатора, в частности кислорода, необходимого для ассимиляции на катодных участках поверхности металла избыточных электронов $4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4(OH)$.

Первое условие всегда выполняется, поскольку технические металлы имеют неоднородную структуру, неодинаковы и условия контакта поверхности стали с бетоном. Учитывая особенности бетона, представляющего собой капиллярно-пористое тело с активной и гидрофильной внутренней поверхностью, можно полагать, что условия 2 и 4 коррозионного процесса в бетоне имеют место. Действительно, бетон почти всегда содержит кроме химически связанной в процессе гидратации цемента физической связанную, т. е. капиллярную и осмотическую воду. Количество физической связанной воды в бетоне, которая в отличие от химически связанной может служить электролитом — проводником зарядов между анодными и катодными участками поверхности стали, зависит как от особенностей бетона, так и от среды и условий взаимодействия ее с конструкцией. При длительном погружении в воду может произойти практически полное насыщение капилляров и пор бетона. В этом случае водосодержание тем больше, чем выше пористость бетона.

При одностороннем контакте без напора, т. е. при капиллярном подсосе воды, степень насыщения бетона обычно ниже, так как высота всасывания воды находится в обратной зависимости от сечения капилляров. Давление насыщенного пара над мениском воды в капиллярах с радиусом более $1 \cdot 10^{-5}$ см, которые обычно называют макрокапиллярами, практически равно давлению пара над плоской поверхностью, поэтому такие капилляры не всасывают воду и могут заполняться только над напором воды или при конденсации ее, когда в бетоне образуется точка росы.

Содержание воды в бетоне при эксплуатации конструкции в воздушно-влажной среде зависит от ее относительной влажности. При влажности воздуха 100% водосодержание бетона приближается к таковому при капиллярном подсосе. С уменьшением влажности воздуха водосодержание бетона падает. Для стали в бетоне, так же как и для открытого металла, существует некоторая критическая влажность воздуха, ниже которой пленки влаги не могут обеспечить перемещение ионов между анодными и катодными участками ее поверхности. Такое критическое значение относительной влажности воздуха составляет 50 до 60%, если бетон не содержит гигроскопических веществ, например добавок хлористых солей, которые понижают это значение. В бетоне почти всегда достаточно влаги, необходимой для протекания процесса коррозии стали.

Что касается кислорода, то его недостаток может ограничивать процесс коррозии стали, как показали исследования, лишь при практически полном насыщении бетона водой, когда диффузия кислорода резко замедляется. В бетонах высокой плотности (при $V/C < 0,5$) отмечается замедление коррозии при увеличении относительной влажности воздуха сверх 80 ... 85%. В большинстве случаев поровое пространство бетона способно пропустить вполне достаточное количество кислорода для поддержания процесса коррозии арматуры.

Скорость коррозии стали зависит от степени агрессивности водной среды, которая для этого случая может оцениваться рН, и содержания кислорода (рис. 8.5). Отсутствие коррозии стали в бетоне объясняется ее пассивностью в щелочной среде, т. е. неспособностью к растворению по приведенной выше реакции. Если же по той или иной причине поверхность арматуры остается активной или неполностью пассивируется при изготовлении конструкций либо теряет пассивность в процессе эксплуатации конструкции, то происходит коррозия арматуры в бетоне.

Для сохранения пассивности стали в бетоне необходим ее постоянный контакт с поровой жидкостью, щелочность которой должна иметь водородный показатель $pH \geq 11,8$. Это условие обычно соблюдается в плотных бетонах на портландцементе и его разновидностях (шлакопортландцементе, пуццолановом портландцементе), которые уже при затворении водой дают насыщенный раствор гидроксида кальция с $pH \geq 12,6$. В процессе схватывания и твердения цементного теста величина рН может достигать значений 13,5 ... 13,8, что, по-видимому, связано со значительным перенасыщением жидкой фазы, наблюдающимся в этот период и являющимся основой образования кристаллического сростка цементного камня. В затвердевшем бетоне величина рН поровой жидкости составляет 12,0 ... 12,5, что тоже существенно больше, чем указанное выше критическое значение $pH \geq 11,8$.

В обычном плотном бетоне нормального твердения, приготовленном на портландцементе, существует значительный запас гидроксида кальция, ориентировочно составляющий 10 ... 15% от массы цемента. Кроме того, длительно сохраняется так называемый «клинкерный фонд» в виде не полностью прогидратировавших зерен цементного клинкера, из которого могут пополняться запасы $Ca(OH)_2$ в бетоне, если они по той или иной причине израсходуются.

Если цемент содержит активные гидравлические добавки (пуццолановый и шлакопортландцемент), то значительная часть гидроксида кальция ими связывается. То же происходит, когда гидравлической активностью обладает заполнитель, например пористый дробленый керамзитовый или перлитовый песок, в особенности их пылевидные фракции. Связывание гидроксида кальция значительно интенсифицируется при тепловой обработке бетона, что приводит

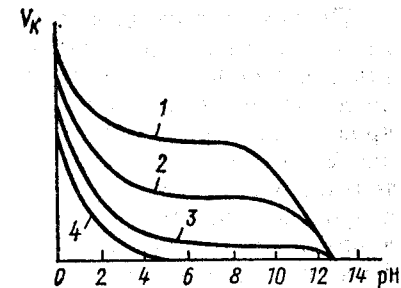


Рис. 8.5. Зависимость скорости коррозии стали от рН растворов (по Вилсону):

1 — при высоком содержании кислорода; 2 — то же, при среднем; 3 — то же, при низком; 4 — при отсутствии кислорода

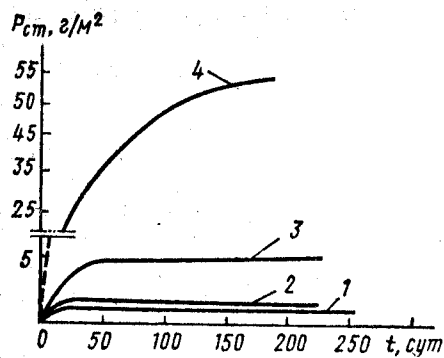


Рис. 8.6. Кинетика коррозии стали $P_{ст}$ в образцах:

1 — непропаренных; 2 — то же, с добавкой 2 % $CaCl_2$ и 1% $NaNO_3$; 3 — то же, с добавкой 2 % $CaCl_2$; 4 — пропаренных с добавкой 2 % $CaCl_2$

Особое внимание следует уделить влиянию добавок хлористых солей, поскольку, даже несмотря на высокое значение pH поровой жидкости в цементных бетонах нормального твердения, присутствие в ней ионов хлора нарушает пассивное состояние поверхности стали (рис. 8.6). Однако в некоторых условиях можно не опасаться развития коррозии арматуры в бетоне с добавками хлористых солей. Хлориды способны образовывать с алюминатами цемента слаборастворимые комплексные соли — гидрохлоралюминаты. Поэтому небольшое количество хлористого кальция, добавленного при затворении бетона, может быть практически полностью связано и не вызывать нарушения пассивности стали. Но необходимо учитывать, что это допустимое количество тем меньше, чем ниже алюминатность цемента и больше содержание в нем гипса, так как последний связывается с алюминатами в первую очередь. Кроме того, связывание хлоридов в гидрохлоралюминаты резко замедляется при тепловой обработке бетона. Если учесть, что при этом понижается pH поровой жидкости, то очевидно, что применения добавок хлоридов при тепловой обработке бетона следует избегать. Наконец, если говорить о влиянии составляющих бетон материалов на его способность пассивировать сталь, то необходимо учитывать особенности заполнителей на основе шлаков и зол. Эти заполнители, как правило, содержат водорастворимые соединения серы в виде сульфатов и сульфидов, способные к химическим превращениям в бетоне, а также часто несгоревшие частицы угля, которые могут играть роль эффективных катодов при непосредственном контакте с поверхностью арматуры.

Сульфат-ионы, хотя и в значительно меньшей степени, чем хлориды, могут также нарушать пассивность стали. В процессе хими-

ческих превращений сульфидов в бетоне возможно образование сероводорода, который при соответствующих условиях, взаимодействуя с поверхностью стали, может вызвать развитие водородной хрупкости в напряженной высокопрочной арматуре.

Известно, что свойства бетона меняются с течением времени под действием среды. Во влажных условиях бетон длительно набирает прочность, его структура уплотняется. В сухих условиях этого не происходит. При периодическом замораживании и оттаивании, увлажнении и высушивании, нагревании и охлаждении происходит расшатывание структуры, разрыхление, вплоть до частичного или полного разрушения бетона. Разрушающе действуют на бетон многие жидкие и газобразные среды. Явления коррозии бетона были рассмотрены выше. Естественно, что если под влиянием тех или иных внешних воздействий защитный слой бетона у арматуры разрушается, то прекращается и его пассивирующее действие.

Однако многие среды, не агрессивные или слабо агрессивные к бетону, агрессивны по отношению к стали, например воздушно-влажная среда, которая по той или иной причине не является пассивной. Аналогично действует периодическое увлажнение даже пресной, не агрессивной к бетону водой. Необходимо подчеркнуть, что до тех пор, пока сталь в бетоне находится в пассивном состоянии, эти воздействия не вызывают ее коррозии.

Рассмотрим причины потери способности пассивировать сталь у бетона, который первоначально обладал ею в полной мере, т. е. плотного бетона на портландцементе без добавок хлоридов. Нарушение пассивности арматуры в таком бетоне связано преимущественно с внешними воздействиями, в результате которых у поверхности арматуры в бетоне падает pH поровой жидкости либо появляются хлор-ионы [1]. Снижение pH бетона связано с уменьшением концентрации $Ca(OH)_2$, которое может произойти либо вследствие ее выщелачивания (вымывания) фильтрующейся через бетон или омывающей его водой, либо в результате нейтрализации кислотными жидкостями и газами.

Нейтрализация бетона — очень распространенный вид взаимодействия его со средой. Наиболее характерным примером является карбонизация бетона надземных конструкций содержащимся в атмосфере углекислым газом, которая в промышленных районах сопровождается нейтрализацией другими кислотными газами (SO_2 , H_2S и др.).

Наибольшая скорость карбонизации бетона наблюдается при относительной влажности воздуха 50...60%, когда пленочной влаги в порах достаточно для осуществления реакции и в то же время микрокапиллярные поры не заполнены водой. При относительной влажности воздуха 25% карбонизация практически прекращается из-за недостатка влаги в бетоне. То же происходит при относительной влажности, близкой к 100%, когда в микропорах происходит капиллярная конденсация водяного пара и их диффузионная про-

ницаемость снижается на несколько порядков. При температуре ниже 0 °С, когда вода превращается в лед, карбонизация практически прекращается. С повышением температуры процесс карбонизации бетона ускоряется, что объясняется облегчением диффузии углекислоты.

Характерной особенностью действия углекислоты на бетон является то, что она в отличие от некоторых других кислых газов и жидкостей не вызывает разрушения структуры бетона, хотя при карбонизации объем твердой фазы может увеличиваться на 17% по отношению к объему исходной $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а это приводит к некоторому уплотнению структуры бетона. По-видимому, поры геля и отчасти микрокапилляры могут быть в результате карбонизации полностью закрыты.

В отличие от углекислоты при действии на бетон SO_2 вслед за сильным уплотнением структуры образующимся гипсом, что вызывает даже заметное возрастание прочности, наступает ее разрушение, которое выражается в шелушении поверхности бетона. Такое действие, очевидно, связано с более значительным, чем при карбонизации, увеличением объема твердой фазы, имеющим место в этом случае.

Хлористый водород разрушает бетон полностью, поскольку образующиеся при взаимодействии его с продуктами гидратации цемента хлористые соли хорошо растворимы и не обладают вяжущими свойствами.

Из трех основных элементарных процессов: диффузии углекислого газа в порах бетона, диффузии гидроксида кальция в пленке влаги на поверхности пор и химической реакции между ними — наиболее медленным в плотном бетоне является диффузия CO_2 , которая и определяет скорость процесса в целом, а также его послойный характер. Естественно, что при малой относительной влажности воздуха ($\leq 25\%$) и соответственно сухом бетоне карбонизация его ограничивается уже не диффузией CO_2 , а диффузией $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и, возможно, химической реакцией между ними.

Для описания процесса карбонизации бетона в нормальных влажностных условиях можно использовать уравнение диффузии Фика и получить хорошо совпадающую с экспериментальными данными формулу для расчета глубины карбонизации:

$$x = \sqrt{\frac{2D'c_0}{m_0} t}, \quad (8.6)$$

где D — эффективный коэффициент диффузии CO_2 в карбонизационном слое бетона, зависящий от величины и характера пористости, в частности от V/Ω (рис. 8.7), а также от степени наполнения пор водой; c_0 — концентрация углекислоты в воздухе; m_0 — количество углекислоты, которое может быть поглощено единицей объема бетона (зависит от содержания CaO в цементе); t — время.

Таким образом, глубина карбонизации зависит от концентрации CO_2 , степени проницаемости структуры бетона, т. е. от водоцементного отношения, характера заполнителей и добавок, условий твердения и влажности бетона, а также от вида и расхода вяжущего, определяющих «буферную емкость» бетона — содержание CaO в единице его объема. Приведенная формула позволяет определить продолжительность карбонизации бетона в защитном слое определенной толщины или же назначить толщину и плотность бетона в защитном слое, обеспечивающие требуемый срок сохранения критических значений рН у поверхности арматуры в данных условиях эксплуатации.

Используя зависимость процесса карбонизации от концентрации углекислоты, можно прогнозировать его ход на основании ускоренных испытаний образцов бетона при повышенной концентрации CO_2 с помощью формулы

$$x_1 = x_2 \sqrt{c_1 t_1 / (c_2 t_2)}, \quad (8.7)$$

где x_1 и x_2 — глубины карбонизации соответственно при концентрации углекислоты в воздухе c_1 и c_2 в течение времени t_1 и t_2 .

Приведенные уравнения применимы к бетону относительно однородной плотной структурой. Наличие межзерновой пустотности, связанное с недостатком растворной составляющей или с ее неравномерным распределением в бетоне при плохом уплотнении смеси, резко облегчает диффузию CO_2 в глубь бетона. Крупные пустоты в бетоне позволяют углекислоте практически беспрепятственно проникать в слои, непосредственно контактирующие с арматурой, и приводить к быстрому нарушению ее пассивности. При применении некоторых легких бетонов, обладающих высокой пористостью и наличием сравнительно крупных пор, необходимо особо устанавливать возможность коррозии стали и применять меры, обеспечивающие ее сохранность.

По диффузионной проницаемости бетона можно прогнозировать долговечность конструкции из условий сохранности арматуры. В табл. 8.3 приведен пример расчета длительности защитного действия для различных составов легкого бетона, выполненного на основании экспериментальных данных. Как видно из данных табл. 8.3, диффузионная проницаемость бетона, которая зависит от состава бетона и свойств использованных материалов, позволяет не

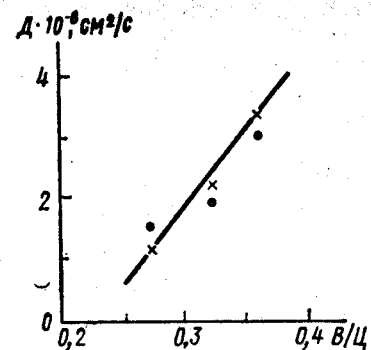


Рис. 8.7. Зависимость коэффициента диффузии D цементного камня от V/Ω

Таблица 8.3. Изменение эффективного коэффициента диффузии в зависимости от крупности и влажности заполнителя

Керамзитобетон на песке	Расход цемента, кг/м³	Эффективный коэффициент диффузии CO ₂ в бетоне $D' \cdot 10^4$, см²/с		Продолжительность, годы, периода нейтрализации защитного слоя бетона толщиной 20 мм на керамзите			
		с максимальной крупностью гравия, мм		сухом при крупности		влажном	
		20	10	5...10	5...20		
Пористом	300	0,72	0,54	5,1	>100	58	6
Кварцевом	300	2,28	0,89	6,5	>57	35	12
Пористом	380	0,7	0,16	4,99	>100	90	13
Кварцевом	380	2,92	0,35	5,9	>100	50	15

только качественно сравнить составы бетона, но и количественно оценить их защитную способность [79].

Обеспечить сохранность арматуры в тяжелых и легких бетонах можно повышением плотности самих бетонов, уменьшением их проницаемости, повышением их защитных свойств путем введения ингибирующих и уплотняющих добавок. Однако существуют бетоны, которые не могут обеспечить сохранности арматуры, так как имеют пониженное рН поровой жидкости бетона. К таким бетонам относятся цементные или силикатные бетоны автоклавного твердения, бетоны на гипсоцементно-пуццолановом вяжущем и др. Сохранность арматуры в таких бетонах обеспечивается нанесением на арматуру специальных покрытий: цементно-битумных, цементно-полистирольных, цементно-латексных.

Если названных мер защиты недостаточно для обеспечения долговечности железобетонной конструкции, то необходимо применять специальные защитные покрытия по бетону, которые рекомендуются Строительными нормами по защите строительных конструкций от коррозии (СНиП 2.03.11—85).

§ 8.5. КОРРОЗИЯ БЕТОНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ЩЕЛОЧЕЙ ЦЕМЕНТА НА КРЕМНЕЗЕМ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

В практике строительства известны случаи разрушения бетона вследствие реакции между гидроксидами натрия и калия, содержащимися в цементе, и активной формой кремнезема заполнителя. При этой реакции наблюдается расширение бетона и появление в нем значительных внутренних напряжений, которые могут привести к образованию трещин и постепенному разрушению материала. Реакция проходит сравнительно медленно, и признаки разрушения наблюдаются в поздние сроки.

Механизм расширения еще полностью не выяснен, и существует несколько гипотез, объясняющих это явление. Наиболее простым

является предположение, что бетон разрушает давление, создаваемое расширяющимся при реакции зернами заполнителя. Однако наибольшее распространение получила гипотеза, по которой главную роль играют расширение и давление, создаваемые продуктом реакции. На фотоснимках хорошо видно, что зерна заполнителя как бы окружены продуктами реакции — гелем щелочных силикатов и некоторым количеством гидрата оксида кальция. Предполагается, что цементный камень, окружающий зерна заполнителя, является как бы полупроницаемой мембраной, через которую гидраты щелочей диффундируют к зоне реакции, а для продуктов реакции эта мембрана непроницаема. Накопление продуктов реакции на зернах заполнителя создает значительное давление, которое может в некоторых случаях привести к разрушению бетона. Это давление будет зависеть от содержания щелочей в цементе, вида заполнителя, его активности по отношению к рассматриваемой реакции, крупности и ряда других факторов. Для возникновения и протекания реакции необходимо относительно высокое содержание щелочей в цементе и присутствие определенного количества зерен высокоактивных компонентов в заполнителе. Обычно в цементе содержание щелочей колеблется от 0,4 до 1%. Если содержание щелочей меньше 0,6%, то очень мала вероятность разрушения от реакции между ними и реакционноспособными заполнителями.

В реакцию с щелочами цемента могут вступать опал, халцедон, тридимит, кристобалит, некоторые стекловидные вулканические породы кислого состава и видоизмененные сланцы. Наиболее реакционноспособным является опаловидный кремнезем, который встречается в некоторых сланцах и известняках. При наличии в заполнителе зерен реакционноспособного материала наблюдается расширение бетона. На рис. 8.8 показаны относительные деформации расширения раствора 1:2 при В/Ц=0,5 при замене стандартного вольского песка опалом или халцедоном, полученные В. М. Москвиным и Г. С. Рояком. Наибольшее расширение наблюдается при «критическом» содержании реакционноспособных материалов в заполнителе. Для опала эта величина составляет 3...5%, а для менее активных материалов повышается до 10...20% и более. Для очень активных материалов максимальное расширение увеличивается при применении более крупных фракций заполнителя, для малоактивных наблюдается обратное явление. Значительное расширение име-

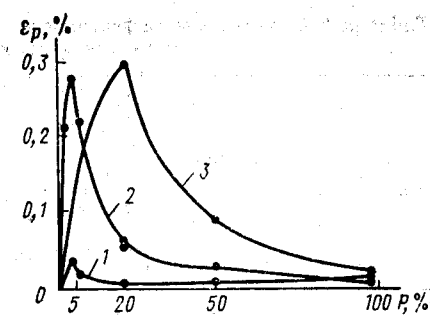


Рис. 8.8. Влияние количества опала и халцедона P , введенного в нормальный вольский песок, на расширение ϵ_p раствора 1:2 при В/Ц=0,5: 1 — опал, испытания в возрасте 1 мес; 2 — опал, то же, 3 мес; 3 — халцедон, то же, 6 мес

ет место в плотных бетонах. При увеличении пористости бетона и наличии достаточного объема пор и пустот для размещения продуктов реакции величина расширения уменьшается.

При наличии в заполнителях реакционноспособных к щелочам компонентов следует применять специальные меры, предохраняющие бетон от этого вида коррозии: использовать цементы с низким содержанием щелочей (менее 0,5%) или применять специальные цементы с тонкомолотыми добавками, способствующими поглощению и связыванию щелочей цемента, в частности некоторые виды пуццолановых цементов, а также вводить в бетон газообразующие или воздухововлекающие добавки для создания резервного объема пор для продуктов реакции между щелочами цемента и заполнителем.

ГЛАВА 9

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА

§ 9.1. ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

При возведении монолитных конструкций и изготовлении изделий на полигонах бетон обычно твердеет при положительной температуре 5 ... 35 °С. При достаточной влажности воздуха рост прочности бетона продолжается длительное время. Для ориентировочного определения прочности бетона в разном возрасте используют формулу

$$R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}, \quad (9.1)$$

где R_n , R_{28} — прочность бетона на сжатие в возрасте n и 28 сут; $\lg n$, $\lg 28$ — десятичный логарифм возраста бетона.

Эта формула дает удовлетворительные результаты при $n > 3$ для бетонов, приготовленных на рядовом портландцементе и твердевших при температуре 15 ... 20 °С. В действительности темп роста прочности бетона, особенно в раннем возрасте, будет зависеть от многих факторов: минералогического состава и тонкости помола цемента, состава бетона, В/Ц, вида и дозировки использованных химических добавок. Нарастание прочности ускорится, если применяются быстротвердеющие цементы, добавки — ускорители твердения, бетоны с низким водоцементным отношением. В табл. 9.1 показана относительная прочность бетонов разного возраста, приготовленных при различных В/Ц (за 1 принята прочность бетона в возрасте 28 сут). Чем меньше В/Ц, тем выше темп роста прочности бетона.

Логарифмический закон роста прочности твердения устанавливается после образования первоначальной структуры бетона, т. е.

Таблица 9.1. Относительная прочность бетона в разном возрасте

В/Ц	Относительная прочность R_n/R_{28} при n , сут					
	1	3	7	28	90	360
0,4	0,24	0,48	0,7	1	1,15	1,38
0,5	0,17	0,43	0,66	1	1,19	1,47
0,6	0,11	0,37	0,64	1	1,21	1,55
0,7	0,08	0,33	0,63	1	1,35	1,67
По формуле (9.1)	—	0,33	0,58	1	1,35	1,77

после приобретения бетоном определенной первоначальной прочности (см. гл. 4). В этом случае для него будет характерен график, показанный на рис. 9.1. Как следует из графика, прочность бетона в возрасте n сут может быть определена, если известна его прочность в возрасте k и 28 сут (или k и m сут), на основе соотношения

$$\frac{R_n - R_k}{R_{28} - R_k} = \frac{\lg n - \lg k}{R_{28} - \lg k}, \quad (9.2)$$

откуда

$$R_n = R_k + (R_{28} - R_k) \frac{\lg n - \lg k}{\lg 28 - \lg k}. \quad (9.3)$$

Эта формула позволяет более полно учесть влияние различных факторов на твердение бетона.

Анализ табл. 9.1 показывает, что в возрасте 1 ... 3 сут В/Ц оказывает более заметное влияние на прочность бетона, чем в позднем возрасте. На рис. 9.2 проведены зависимости $R_{отн} = f(\text{Ц/В})$ для бетона в возрасте 1, 3 и 7 и 28 сут. За сравнительный эталон

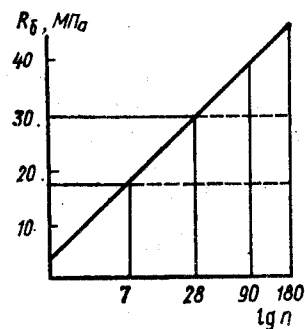


Рис. 9.1. Рост прочности бетона (в логарифмическом масштабе времени)

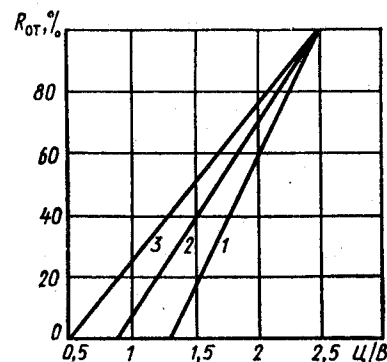


Рис. 9.2. Зависимость $R_{отн} = f(\text{Ц/В})$ для бетона в возрасте: 1 — 1 сут; 2 — 3 сут; 3 — 7 и 28 сут

принята прочность бетона при Ц/В=2,5 (В/Ц=0,4), т. е. $R_{отн} = R_{Ц/В=i} / R_{Ц/В=2,5}$.

На основе этих зависимостей прочность бетона ориентировочно можно определить по формулам: в возрасте 1 сут

$$R_{61} = A_1 R_{Ц1} \left(\frac{Ц}{В} - 1,3 \right); \quad (9.4)$$

в возрасте 3 сут

$$R_{63} = A_3 R_{Ц3} \left(\frac{Ц}{В} - 0,9 \right), \quad (9.5)$$

где R_{61} , R_{63} — прочность бетона при сжатии в возрасте 1 и 3 сут; A_1 , A_3 — коэффициенты, учитывающие влияние на прочность бетона заполнителей и других факторов и принимаемые в соответствии с рекомендациями табл. 5.2; $R_{Ц1}$, $R_{Ц3}$ — активность цемента в возрасте 1 и 3 сут.

Если активность цемента в возрасте 1 и 3 сут известна, то можно ориентировочно принять

$$R_{Ц1} = k_{Ц1} R_{Ц28}; \quad (9.6)$$

$$R_{Ц3} = k_{Ц3} R_{Ц28}, \quad (9.7)$$

где $R_{Ц28}$ — активность цемента в возрасте 28 сут; $k_{Ц1}$ и $k_{Ц3}$ — поправочные коэффициенты; для цемента в возрасте 1 и 3 сут $k_{Ц1} = 0,2$ для медленнотвердеющих цементов; 0,24 для обычных рядовых цементов; 0,28 для быстротвердеющих и высокопрочных цементов; для цементов в возрасте 3 сут соответственно принимают 0,43, 0,48, 0,53.

В возрасте 7 сут и более зависимость $R_6 = f(Ц/В)$ имеет вид, аналогичный зависимости $R_{28} = f(Ц/В)$, т. е. влияние Ц/В проявляется здесь одинаковым образом и прочность бетона определяется темпом твердения цемента. Ориентировочно можно принять

$$R_{6n} = k_{Цn} R_{28} = k_{Цn} A R_{Ц1} (Ц/В - 0,5), \quad (9.8)$$

где R_{6n} — прочность бетона в возрасте n сут ($n > 7$); $k_{Цn}$ — коэффициент, зависящий от времени твердения и качества материалов; A — коэффициент для формулы прочности бетона в возрасте 28 сут (см. табл. 5.2).

Коэффициент $k_{Цn}$ или обобщенный коэффициент $k_n = k_{Цn} A$ можно определить по результатам экспериментов по формулам

$$k_n = a + b \lg n, \quad k_{Цn} = a_1 + b_1 \lg n, \quad (9.9)$$

где a , b — постоянные величины, определяемые опытным путем для конкретного цемента и заполнителя, использованных в бетоне.

Таблица 9.2. Классификация цементов по скорости твердения

Тип цемента	Минералогическая характеристика	$K_{28 \dots 90} = \frac{R_{90}}{R_{28}}$	$K_{28 \dots 180} = \frac{R_{180}}{R_{28}}$
I	Алюминатный цемент ($C_3A > 12\%$)	1...1,05	1...1,1
II	Алитовый цемент ($C_3S > 50\%$, $C_3A < 8\%$)	1,05...1,2	1,1...1,3
III	Цемент со сложной минералогической характеристикой (пуццолановый, портландцемент с содержанием $C_4AF > 14\%$, шлакопортландцемент при содержании шлака 30...40%)	1,2...1,5	1,3...1,8
IV	Белитовый портландцемент и шлакопортландцемент при содержании шлака более 50%	1,6...1,7	1,85
	Для сравнения $R_n = R_{28} \frac{\lg n}{\lg 28}$	1,35	1,55

Формула (9.9) отражает особенности структурообразования бетона, в частности то, что логарифмическая зависимость прочности от возраста бетона наступает после приобретения бетоном первоначальной прочности (см. гл. 4 и рис. 7.1). Если опытные данные для определения $k_{Цn}$ отсутствуют, то ориентировочно его значения можно установить по формуле

$$k_n = \left[k_7 + (1 - k_7) \frac{\lg n - 0,845}{0,602} \right],$$

где k_7 — значение коэффициента k_n для бетона в возрасте 7 сут, принимаемое в соответствии с его минералогическим составом (см. табл. 9.2) для цементов I типа 0,7, II типа — 0,65, III типа — 0,55, IV типа — 0,5.

Наиболее существенное влияние на темп твердения бетона оказывает минералогический состав цемента. По интенсивности нарастания прочности бетона при нормальной температуре современные цементы делят на четыре типа (табл. 9.2). При этом цементы I и II типа, обеспечивающие более быстрое нарастание прочности бетона в раннем возрасте, резко замедляют прирост прочности в длительные сроки твердения, а бетоны на цементах III и IV типа, медленно твердеющие вначале, показывают заметный рост прочности в течение длительного времени. При благоприятных условиях прочность бетона на этих цементах к полугодовому возрасту возрастает в 1,5...1,8 раза по сравнению с прочностью в возрасте 28 сут, причем отмечается и рост прочности в дальнейшем в течение нескольких лет, хотя и более медленными темпами.

Данные табл. 9.2 показывают, что обычно используемая для описания кинетики твердения бетона формула (9.1) дает более надежные результаты при применении цемента III типа. В других случаях необходимо вводить поправочные коэффициенты, учитывающие особенности твердения бетонов на разных цементах.

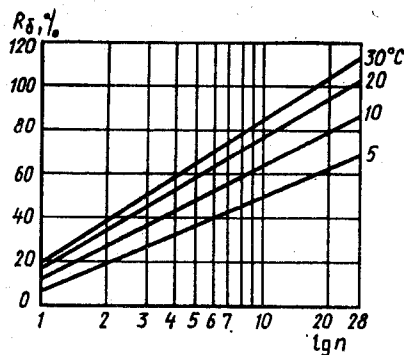


Рис. 9.3. Рост прочности бетона при разной температуре

поверхности. В этих условиях нельзя пользоваться формулой (9.1) или значениями коэффициентов, приведенными в табл. 9.2. Ориентировочно можно считать, что при твердении на открытом воздухе для цементов I и II типа $k_{28 \dots 90} = 1,05$; $k_{28 \dots 180} = 1,1$; для цементов III типа $k_{28 \dots 90} = 1,05$; $k_{28 \dots 180} = 1,25$; для цементов IV типа $k_{28 \dots 90} = 1,1$; $k_{28 \dots 180} = 1,3$.

Способность бетона к длительному твердению можно использовать для экономии цемента. В ряде случаев конструкция воспринимает расчетные нагрузки в более поздние сроки, чем 28 сут. В благоприятных условиях твердение бетона продолжается и к моменту передачи на конструкцию эксплуатационной нагрузки прочность бетона часто превышает требуемую проектом. В подобных случаях, назначая более длительные сроки (90 или 180 сут) достижения бетоном проектной прочности, можно уменьшить R_{28} и сэкономить цемент, так как для получения бетона меньшей прочности требуется более низкий расход цемента.

Заметное влияние на темп твердения бетона оказывают даже сравнительно небольшие колебания температуры воздуха. На рис. 9.3 приведены графики нарастания прочности бетона при различной температуре. Относительная прочность бетона в возрасте 3 сут, например, составляет при твердении при 5°C 0,27 R_{28} , а при 30°C — 0,50 R_{28} , т. е. почти в два раза выше. Поэтому при бетонировании массивных сооружений, особенно в весенне-осенний период, необходимо по возможности учитывать колебания температуры и ее влияние на твердение бетона.

При этом необходимо учитывать, что темп нарастания прочности бетона постепенно замедляется и его окончательная прочность будет зависеть от того, в каком возрасте происходят те или иные колебания температуры.

Если бетон твердеет при разной температуре, то ориентировоч-

Приведенные в табл. 9.2 коэффициенты $k_{28 \dots 90}$ и $k_{28 \dots 180}$ соответствуют нормальным условиям хранения ($t = 15 \dots 20^\circ\text{C}$, $W_{\text{ц}} = 90 \dots 100\%$) небольших образцов. При понижении температуры и влажности воздуха твердение бетонов резко замедляется.

При изготовлении конструкций не всегда удается обеспечить требуемую влажность в течение всего срока твердения бетона, так как отделочные, монтажные и другие работы часто требуют не только уменьшения влажности бетона, но даже высушивания его

но его прочность к определенному возрасту можно определить как сумму прочностей, достигнутых за периоды твердения при различной температуре:

$$R_6 = \Delta R_1 + \Delta R_2 + \dots + \Delta R_n, \quad (9.10)$$

где $\Delta R_1, \Delta R_2, \dots, \Delta R_n$ — изменение прочности за периоды с температурами t_1, t_2, \dots, t_n .

Расчеты можно производить графически с помощью кривых $R_6 = f(n, T)$, полученных опытным путем (рис. 9.4). При этом необходимо, чтобы прочности, достигнутые к моменту изменения температур, сопрягались между собой (на рисунке ход расчета показан стрелками).

Для аналитических расчетов $\Delta R_1, \dots, \Delta R_n$ используют формулы (9.8) и (9.9), определяя коэффициент k_n для кривых, показывающих твердение бетона при разных температурах. Например, по данным рис. 9.3 получим для $t = 5^\circ\text{C}$ $k_{n5} = 0,06 + 0,44 \lg n$, для $t = 10^\circ\text{C}$ $k_{n10} = 0,1 + 0,54 \lg n$, для $t = 20^\circ\text{C}$ $k_{n20} = 0,16 + 0,61 \lg n$, для $t = 30^\circ\text{C}$ $k_{n30} = 0,2 + 0,64 \lg n$. Отсюда прочность бетона в возрасте n сут для бетона, твердевшего при $t = 5^\circ\text{C}$, будет выражена формулой

$$R_n = (0,06 + 0,44 \lg n) R_6.$$

В действительности изменения температуры не происходят мгновенно. Интенсивность нагрева и остывания зависит от перепада температур, свойств бетона, массивности конструкции, тепловыделения цемента и других факторов, и обычно ее расчет весьма трудоемок. Поэтому для ориентировочных расчетов можно условно принять скачкообразное изменение температуры, тем более что на прочность бетона, твердевшего при разных температурах, влияют все те факторы (минералогический состав цемента, В/Ц и др.), о которых говорилось выше, когда рассматривался вопрос о твердении бетона при стандартной температуре и влажности, которые также вносят определенные коррективы в результаты расчетов. Поэтому более точные результаты получают, если используют действительные кривые роста прочности бетона при разной температуре, полученные для конкретного состава бетона по результатам предварительных опытов.

Большое значение для твердения бетона имеет организация

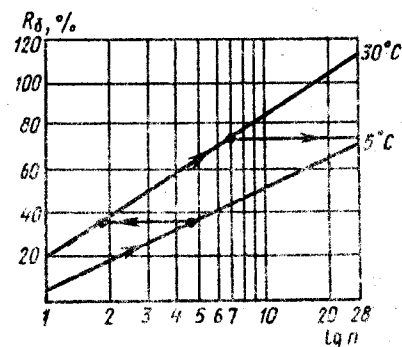


Рис. 9.4. Графический способ определения прочности бетона в определенном возрасте при твердении при разной температуре (пунктиром показано решение, когда бетон первые 5 сут твердеет при 5°C, а последующие 5 сут — при 30°C)

ухода за ним, особенно в раннем возрасте. Целью ухода является создание благоприятных условий для твердения бетона, сохранение надлежащей влажности среды. Для этого бетон укрывают полимерной пленкой, посыпают песком, который постоянно увлажняют, используют маты из синтетических материалов, устраивают покрывающие водные бассейны или используют другие способы, предохраняющие бетон от высыхания, чтобы избежать замедления процессов гидратации цемента и роста прочности бетона. При быстром высыхании бетона в раннем возрасте возникают значительные деформации усадки, появляются микротрещины. В результате ухудшается структура бетона, снижается его конечная прочность. Исправить структуру созданием благоприятных условий в последующем не удастся, поэтому правильный уход за бетоном в раннем возрасте является необходимым условием получения доброкачественного бетона.

Пример 9.1. Определить прочность бетона в возрасте 90 сут, если его прочность в возрасте 7 и 28 сут соответственно была 19 и 31 МПа.

По формуле (9.3) $R_{90} = 19 + (31 - 19)(1,954 - 0,845) / (1,447 - 0,845) = 41,1$ МПа.

Пример 9.2. Определить прочность бетона, приготовленного на портландцементе М500 и гранитном щебне при В/Ц=0,5 в возрасте 1 и 3 сут.

По формулам (9.4) и (9.6), $R_{61} = 0,65 \cdot 0,24 \cdot 500 \cdot 0,1(1/0,5 - 1,3) = 5,46$ МПа.

По формулам (9.5) и (9.7), $R_{63} = 0,65 \cdot 0,48 \cdot 500 \cdot 0,1(1/0,5 - 0,9) = 17,16$ МПа.

Пример 9.3. Определить зависимость коэффициента k_n от сроков твердения и вывести формулу роста прочности бетона, если известно, что его прочность в возрасте 7 и 28 сут соответственно была 14 и 20 МПа.

Из уравнения $R_{28} = (a + b \lg 28)R_{28}$ получим $a = 1 - 1,447 b$.

Из уравнения $R_7 = (a + b \lg 7)R_{28}$ получим $14/20 = a + 0,845 b = 1 - 1,447 b + 0,845 b = 1 - 0,602 b$.

Отсюда $a = 0,28$; $b = 0,5$ и $k_n = 0,28 + 0,5 \lg n$.

Формула роста прочности во времени для данного бетона $R_n = (0,28 + 0,5 \lg n)R_{28}$.

Пример 9.4. Определить ориентировочное значение k_n для бетона в возрасте 20 сут, приготовленного на цементе II типа.

По формуле (9.10) $k_{20} = 0,65 + (1 - 0,65)(\lg 20 - 0,845) / 0,602 = 0,91$.

Пример 9.5. Определить относительную прочность бетона R_n/R_{28} в возрасте 10 сут, если первые 5 сут он твердел при $t = 5^\circ\text{C}$, а затем 5 сут при $t = 30^\circ\text{C}$.

Рост прочности при различной температуре соответствует результатам опытов, приведенных на рис. 9.3. Графическое решение представлено на рис. 9.4. За первые 5 сут бетон приобретает прочность $0,37R_{28}$, за вторые 5 сут — $0,36R_{28}$. Прочность в возрасте 10 сут $R_{10} = (0,37 + 0,36)R_{28} = 0,73R_{28}$.

Для аналитического решения используем формулы $R_5 = (0,06 + 0,44 \lg n)R_{28}$; $R_{30} = (0,2 + 0,65 \lg n)R_{28}$.

За первые 5 сут $R_5/R_{28} = 0,06 + 0,44 \cdot 0,699 = 0,37$.

Твердение при $t = 30^\circ\text{C}$ дает эту прочность за n_1 сут, причем $\lg n = (0,37 - 0,2) / 0,64 = 0,266$, откуда $n_1 = 1,8$.

Относительная прочность бетона в возрасте 10 сут $R_{10}/R_{28} = 0,2 + 0,64(\lg n_1 + 5) = 0,2 + (0,64 \cdot 0,833) = 0,73$.

Пример 9.6. Определить прочность бетона в возрасте 28 сут, если его прочность в возрасте 3 и 7 сут соответственно была 17 и 28 МПа.

$R_{28} = R_3 + (R_7 - R_3)(\lg 28 - \lg 3) = 17 + (28 - 17)(1,447 -$

$- 0,480) / (0,845 - 0,480) = 46,1$ МПа.

Пример 9.7. Определить экономию цемента, если проектная прочность бетона 40 МПа должна быть достигнута к возрасту 180 сут. Цемент М400 IV типа (по табл. 9.2), расход воды 180 л/м^3 . $R_{28} = 40/1,8 = 22,2$ МПа.

Для $R = 40$ МПа $В/Ц = 0,6 \cdot 400 \cdot 0,1 / (40 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 400 \cdot 0,1) = 0,46$; $Ц = 180 / 0,46 = 391 \text{ кг/м}^3$.

Для $R_0 = 22,2$ МПа $В/Ц = 0,6 \cdot 400 \cdot 0,1 / (22,2 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 400 \cdot 0,1) = 0,7$; $Ц = 180 / 0,7 = 257 \text{ кг/м}^3$.

Экономия цемента составит 134 кг/м^3 , или 34%.

§ 9.2. ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Нормальной температурой среды для твердения бетона условно считается $15 \dots 20^\circ\text{C}$. При пониженной температуре прочность бетона нарастает медленнее, чем при нормальной. При температуре бетона ниже 0°C твердение практически прекращается, если только в бетон не добавлены соли, снижающие точку замерзания воды. В зимний период наблюдаются частые переходы температуры через 0°C , что непосредственно отражается на твердении бетона. Бетон, начавший твердеть, а затем замерзший, после оттаивания продолжает твердеть в теплой среде, причем, если он не был поврежден замерзающей водой в самом начале твердения, прочность его постепенно нарастает (рис. 9.5), однако, как правило, отстает от роста прочности бетона, твердевшего при нормальной температуре.

Бетон, укладываемый зимой, должен зимой же приобрести прочность, достаточную для распалубки, частичной нагрузки или даже для полной загрузки сооружения. Замерзание бетона в раннем возрасте влечет за собой значительное понижение его прочности после оттаивания и в процессе дальнейшего твердения по сравнению с нормально твердевшим бетоном. Это объясняется тем, что свежий бетон насыщен водой, которая при замерзании расширяется и разрывает связь между поверхностью заполнителей и слабым цементным камнем. Прочность бетона тем ближе к нормальной, чем позже он был заморожен (см. рис. 9.5). Кроме того, из-за раннего замораживания значительно уменьшается сцепление бетона со стальной арматурой в железобетоне.

При любом способе производства бетонных работ бетон следует предохранить от замерзания до приобретения им минимальной (критической) прочности, которая обеспечивает необходимое сопротивление давлению льда и сохранение в последующем при положительных температурах

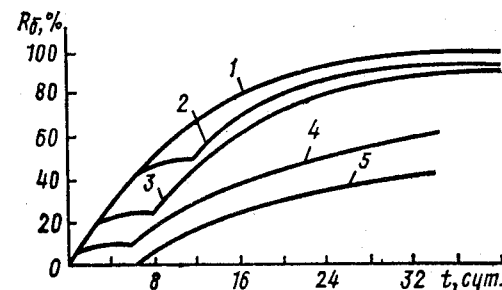


Рис. 9.5. Зависимость относительной прочности бетона R_0 от его возраста t в момент замораживания (В/Ц=0,6).

1 — бетон незамороженный; 2 — бетон, замороженный в возрасте 7 сут; 3 — то же, 3 сут; 4 — то же, 1 сут; 5 — то же, 6 ч

Таблица 9.3. Минимальная прочность, которую бетон должен приобрести к моменту замерзания

R_{28} , МПа	Минимальная прочность, не менее		Время выдерживания бетона на портландцементе при 15...20 °С, сут
	% от R_{28}	МПа	
10	50	5	5...7
20	40	7	3...5
30	35	10	2...2,5
40	30	12	1,5...2
50	25	12,5	1...2

способности к твердению без значительного ухудшения основных свойств бетона (табл. 9.3).

При использовании быстротвердеющего высокопрочного цемента необходимое время выдерживания сокращается примерно в полтора раза. Если к бетону предъявляются высокие требования по динамическим свойствам, водонепроницаемости и морозостойкости, то его следует предохранять от замерзания до достижения марочной прочности, так как замораживание при минимальной прочности, не сказываясь заметно на прочности бетона при сжатии, может нарушить его структуру и ухудшить эти особые свойства.

При введении в бетон повышенного количества солей: хлористого кальция CaCl_2 , хлористого натрия NaCl , нитрата натрия NaNO_3 , поташа K_2CO_3 — он приобретает способность медленно твердеть при отрицательных температурах, так как соли понижают точку замерзания воды и сохраняют жидкую фазу в бетоне. Количество соли, добавленное в бетон, зависит от ожидаемой средней температуры твердения бетона (табл. 9.4).

Бетонная смесь с добавкой поташа быстро густеет и схватывается, что затрудняет ее укладку в опалубку. Для сохранения удобоукладываемости бетонной смеси с поташом в нее добавляют СДБ или мылонафт. Для приготовления бетонной смеси с противоморозными добавками можно использовать холодные заполнители, укладывать бетонную смесь с температурой до -5°C .

Таблица 9.4. Рекомендуемое содержание противоморозных добавок в бетоне, % от массы цемента (в расчете на безводную соль)

Температура твердения бетона, °С до	$\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$	NaNO_3	K_2CO_3
-5	3+0 или 0+3	4...6	5...6
-10	3,5+1,5	6...8	6...8
-15	3,5+4,5	8...10	8...10
-20	—	—	10...12
-25	—	—	12...15

Таблица 9.5. Прочность бетона с противоморозными добавками, % от R_{28}

Вид добавки	Температура твердения бетона, °С	Время твердения на морозе, сут		
		7	14	28
Хлористые соли	-5	36	65	80
	-10	26	35	45
	-15	15	25	35
Поташ	-5	50	65	75
	-10	30	50	70
	-15	25	40	60
	-20	22	35	55
	-25	20	30	50

Прочность бетона на портландцементе с добавками, твердеющего на морозе, может быть определена ориентировочно по табл. 9.5. Бетон с добавкой нитрита натрия при температуре -5°C твердеет медленнее, а при температурах ниже -10°C почти так же, как бетон с добавкой хлористых солей.

Способ зимнего бетонирования с применением противоморозных добавок прост и экономичен, но большое количество соли, вводимой в бетон, может ухудшить структуру, долговечность и некоторые особые свойства. При эксплуатации конструкции во влажных условиях имеется опасность коррозии арматуры от действия хлористых солей (нитрит натрия и поташ коррозии не вызывают). Кроме того, образующиеся в процессе твердения бетона с добавками едкие щелочи могут вступить в реакцию с активным кремнеземом, содержащимся в некоторых заполнителях, и вызвать коррозию бетона.

Поэтому бетон с противоморозными добавками не рекомендуется применять в ответственных конструкциях, в конструкциях, предназначенных для эксплуатации во влажных условиях, при наличии реакционноспособного кремнезема в зернах заполнителя, а бетон с хлористыми солями — в железобетонных конструкциях.

§ 9.3. ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Для ускорения твердения бетона используют различные способы: *механические* — повышение удельной поверхности цемента или активация бетонной смеси; *химические* — введение добавок (CaCl_2 , НК и др.), ускоряющих твердение; *тепловые* — пропаривание и электропрогрев. Первые два способа рассматриваются в гл. 11. Тепловые способы, получившие наибольшее распространение в производстве сборного железобетона, требуют более подробного рассмотрения, так как для получения требуемых свойств бетона при производстве железобетонных изделий часто приходится учитывать режимы прогрета и еще целый ряд факторов.

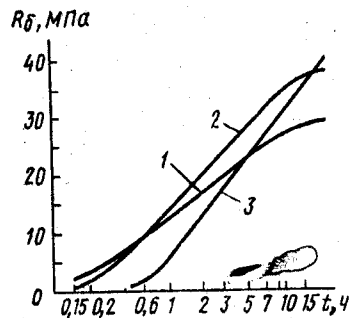


Рис. 9.6. Зависимость прочности бетона от времени пропаривания на цементах минералогических групп III, II и III одинаковой активности в логарифмическом масштабе времени (соответственно кривые 1...3)

Как известно, нагрев ускоряет химические реакции. Повышение температуры бетона активизирует взаимодействие воды и цемента и ускоряет твердение бетона. При этом фазовый состав продуктов гидратации цемента, твердеющего при разных температурах, практически остается одинаковым. Рост прочности бетона при нагреве может, как и при нормальном твердении, выражаться логарифмической зависимостью, однако со своими коэффициентами. По данным ВНИИ-железобетона,

$$R = A (\lg t - \lg t_0), \quad (9.11)$$

где A — параметр, характеризующий поведение цемента при пропаривании в принятых условиях испытания, МПа; t — время тепловой обработки, включающее период изотермической выдержки t_1 и часть времени разогрева и охлаждения, в течение которого температура образцов превышала 60°C , ч, в среднем $t = t_1 + 3$; t_0 — индукционный период твердения, ч (предварительный период до начала образования прочной структуры).

Формула (9.11) была выведена для бетона на специально изготовленных цементах различного минералогического состава при прогреве его по режиму $3 + t_1 + 2$ ч с предварительной выдержкой 2 ч и испытании через 6 ч после извлечения из пропарочной камеры. Опыты позволили установить значения A и t_0 (при графических построениях зависимости, рис. 9.6) и тем самым уточнить влияние минералогического состава цемента на прочность бетона при пропаривании (табл. 9.6).

Приведенные данные показывают, что минералогический состав цемента оказывает заметное влияние на прочность бетона. В пер-

вые часы пропаривания наиболее высокую прочность показывают бетоны на цементах II и III групп, причем тем более высокую, чем больше в клинкере C_3S . Прочность бетонов на цементах I группы в этот период значительно меньше и только к 3...4 ч достигает, а затем становится больше прочности бетонов на цементах III группы, а к 6...7 ч достигает прочности бетонов на цементах II группы. После этого рост прочности цемента I группы продолжается практически до 20...24 ч изотермической выдержки, тогда как рост прочности цемента II группы практически прекращается к 6...7 ч изотермической выдержки, а цемента III группы — 6 ч.

Таблица 9.7. Влияние минералогического состава цемента на предельную прочность бетона при пропаривании

Вид цемента	Средняя активность цемента, МПа	Отношение предельной прочности бетона к активности цемента	Ориентировочное время достижения предельной прочности, ч	Продолжительность изотермической выдержки для достижения $0,8R_{пр}$, ч
Портландцемент:				
I группы	32,5	1,45	27...33	12
II группы	35,0	1,15	15...18	6
III группы	27,5	1,10	10...12	4
ОБТЦ	39,0	1,05	12...15	3
Шлакопортландцемент:				
с 30 % шлака	24,0	1,55	25...30	8
с 50 % шлака	17,0	1,85	27...30	14

Приведенные данные показывают, что минералогический состав цемента оказывает заметное влияние на прочность бетона. В первые часы пропаривания наиболее высокую прочность показывают бетоны на цементах II и III групп, причем тем более высокую, чем больше в клинкере C_3S . Прочность бетонов на цементах I группы в этот период значительно меньше и только к 3...4 ч достигает, а затем становится больше прочности бетонов на цементах III группы, а к 6...7 ч достигает прочности бетонов на цементах II группы. После этого рост прочности цемента I группы продолжается практически до 20...24 ч изотермической выдержки, тогда как рост прочности цемента II группы практически прекращается к 6...7 ч изотермической выдержки, а цемента III группы — 6 ч.

Предельные значения прочности бетона, которые могут быть получены в процессе тепловой обработки, зависят от вида цемента. В табл. 9.7 приведены данные ВНИИ-железобетона, показывающие отношение предельной прочности бетона при $\text{Ц/В} = 2 \dots 2,5$ к активности цемента при пропаривании, а также продолжительность тепловой обработки, при которой эти значения достигаются.

Поскольку скорость нарастания прочности в процессе тепловой обработки, достигая наивысших значений в первые часы, затем резко уменьшается, то практически нецелесообразно проводить обработку до получения предельной прочности. Обычно тепловую обработку заканчивают при прочности бетона 70...80% от предельных значений. В этом случае обеспечивается достаточно интенсивный рост прочности бетона после тепловой обработки и она достигает в возрасте 28 сут заданной средней прочности бетона, а время прогрева сокращается в 2...3 раза по сравнению с тем временем, которое потребовалось бы для получения предельной прочности (табл. 9.7). При этом предполагается, что пропаривание начнется приблизительно через 2 ч после формирования изделия, а подъем температуры будет плавным (в течение 3 ч до 80°C).

Таблица 9.6. Параметры A и t_0 для цемента разного минералогического состава

Группа цемента	Минералогический состав цемента, %		Относительное значение A , %	Значение t_0 , ч	Предел линейности функции, ч
	C_3S	C_2A			
I—низкоалюминатные	60	2...3	125	0,6	20...25
	50	2...3	95	0,45	20
II—среднеалюминатные	60...65	8	100	0,15	9...10
	50	8	95	0,2	9...10
III—высокоалюминатные	55	11...12	85	0,15	9
	40...50	11...12	70	0,18	7...8

Применение более коротких режимов, чем указанные в табл. 9.7, будет приводить к перерасходу цемента.

Если рассмотреть суммарное влияние цемента на прочность бетона при пропаривании и на продолжительность тепловой обработки, то наиболее подходящими цементами для этого случая считают шлакопортландцементы, особенно с большой добавкой шлака, и среднеалюминатные цементы с повышенным содержанием C_3S . Следует заметить, что на характер нарастания прочности бетона при тепловой обработке влияют состав бетона и ряд других факторов. В частности, ускорению твердения при пропаривании и других видах тепловой обработки содействует уменьшение водоцементного отношения в бетоне.

Приведенные выше данные и рекомендации относятся к случаям, когда тепловая обработка проводится по рекомендованным оптимальным режимам. Нарушение режимов обработки может привести к резкому ухудшению свойств бетона, к появлению трещин и других дефектов в изделии.

Нагрев бетона приводит к его расширению. Образующиеся новообразования цементного камня как бы закрепляют расширившийся объем бетона. При охлаждении бетон сжимается, однако возникшая структура препятствует этому и в бетоне наблюдаются остаточные деформации, т. е. его объем после тепловой обработки оказывается больше, чем первоначальный. Увеличение объема приводит к повышению пористости бетона и понижению его прочности. Кроме того, при прогреве могут возникать микротрещины и другие дефекты, которые, незначительно изменяя пористость бетона, могут заметно понизить его прочность.

При длительном твердении наивысшую прочность показывает бетон, объем которого при данном количестве материалов является наименьшим, так как в этом случае плотность новообразований цементного камня будет наибольшей. Этим требованиям соответствуют укладка и первоначальное твердение бетона при температуре $0 \dots 4^\circ C$, так как при $4^\circ C$ плотность воды наибольшая.

Уменьшение предельно достижимой прочности при тепловой обработке будет зависеть от ее режима. При нагреве в меньшей мере расширяются цемент, песок и щебень, температурный коэффициент линейного расширения которых колеблется от $8 \cdot 10^{-6}$ до $12 \cdot 10^{-6}$ (коэффициент объемного расширения $\beta = 3\alpha$, т. е. в три раза больше). Температурный коэффициент объемного расширения воды на два порядка больше и зависит от ее температуры:

Температура, $^\circ C$	20...40	40...60	60...80	80...100
$\beta \cdot 10^{-4}$	3,02	4,58	5,87	6,88

При нагреве объем воды соответственно увеличивается:

Температурный интервал нагрева, $^\circ C$	20...40	20...60	20...80	20...100
Увеличение объема воды, %	0,6	1,5	2,7	4,1

Еще в большей мере, если нет препятствий, расширяется при нагреве воздух или пар. На рис. 9.7 показано увеличение объема газообразной фазы в бетоне, которое в условиях свободного расширения при нагреве до $80^\circ C$ превышает первоначальный объем в два раза. В действительности этого не происходит, так как структура бетона препятствует свободному расширению газообразной фазы. В результате в бетоне возникает внутреннее давление (в пузырьках воздуха и пара), которое может достигать $0,01 \dots 0,015$ МПа. Избыточное давление зависит от характера структуры. При определенном давлении сплошность структуры нарушается — пар выходит из бетона, избыточное давление далее не растет и даже снижается, однако при этом может значительно ухудшиться структура бетона.

Важное значение при твердении имеет и контракция цементного камня. Дополнительный объем пор, возникающий вследствие контракции, является тем резервным объемом, в который может отжиматься вода при ее расширении. Поэтому контракция способствует уменьшению дефектности структуры бетона.

Возникновение избыточного давления в бетоне зависит от режима прогрева. Обычно бетон нагревается с поверхности, поэтому и избыточное давление в первую очередь возникает у его поверхности. При медленном нагреве избыточное давление бывает очень небольшим, так как миграция влаги из области с повышенным давлением в более холодные части изделий и диффузия пара способствуют уменьшению избыточного давления. При очень быстром нагреве эти факторы не успевают проявляться в должной мере и избыточное давление резко возрастает, что в ряде случаев может привести к непоправимым дефектам и браку, в частности к вспучиванию верхней поверхности изделий.

Чем прочнее структура бетона, тем лучше она может сопротивляться внутренним напряжениям, возникающим при его нагреве, особенно вследствие нагрева воды и газообразной фазы. Наибольшие изменения в структуре возникают, если нагрев начинается сразу же после окончания формования изделия, когда прочность мала и не оказывает противодействия расширению составляющих бетона, а температурные деформации ничем не ограничены (пропаривание изделия в открытой форме или на поддоне). При этом чем быстрее растет тем-

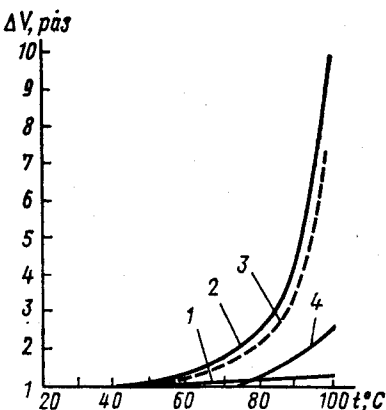


Рис. 9.7. Расширение газовой фазы в бетоне:

1—вследствие расширения воздуха без парообразования при давлении в порах $0,1$ МПа; 2...4—то же, с парообразованием при давлении в порах соответственно $0,1$, $0,11$ и $0,15$ МПа

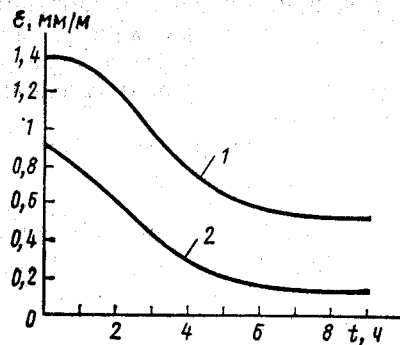


Рис. 9.8. Зависимость деформации бетона при нагреве от продолжительности t предварительной выдержки:

1 — во время изометрического прогрева при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — остаточная деформация

пература бетона, тем больше разрыхляется его структура и увеличивается остаточная деформация.

Если нагрев начинается после того, как бетон схватится и достигнет определенной прочности, то температурные деформации резко уменьшаются, так как образовавшаяся структура противодействует расширению воды и газообразной фазы. Разрыхление структуры и остаточные деформации резко уменьшаются (рис. 9.8), свойства бетона улучшаются. Для получения наилучших результатов необходимо, чтобы прочность структуры в процессе нагрева всегда превосходила внутренние напряжения в бетоне.

В наименьшей степени бетон расширится, если возрастет только объем твердой фазы. Расширение же воды будет компенсировано за счет воздушных пор, а давление газообразной фазы погашено сопротивлением структуры бетона. В этом случае ориентировочно дополнительный объем (по существу, дополнительный объем пор) при нагреве до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ составит $\Delta V_1 = \beta \Delta t = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 1,8 \cdot 10^{-3}$, или $1,8\text{ л/м}^3$ бетона ($0,18\%$).

В том случае, если расширение воды не будет компенсировано, дополнительный объем бетона за счет расширения воды увеличится на $\Delta V_2 = 0,2 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 6 \cdot 10^{-3}$, или на 6 л/м^3 бетона ($0,6\%$). При расчете принято, что вода занимает $1/5$ объема бетона (ориентировочный расход 200 л/м^3), а средний температурный коэффициент объемного расширения в интервале $20 \dots 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ приблизительно равен $500 \cdot 10^{-6}$, т. е. суммарный дополнительный объем от расширения воды и твердой фазы составит $0,78\%$. Если дополнительный объем больше, то это показывает, что на его приращение оказали влияние газообразная фаза и избыточное давление, которое не было компенсировано сопротивлением структуры бетона. Естественно, что в этом случае количество дефектов в структуре увеличится, а прочность бетона уменьшится.

При организации контроля за расширением бетона в процессе тепловой обработки можно считать, что

$$\Delta V = V_2 - V_1,$$

где V_1 — первоначальный объем бетона, равный для куба a^3 (здесь a — сторона куба); V_2 — объем после расширения, равный

$(a+x)^3$; x — удлинение стороны куба, $x = \alpha a \Delta t$;

$$\Delta V = a^3 + 3a^2x + 3ax^2 + x^3 - a^3 \approx 3a^2x \approx 3\alpha a^3,$$

так как $3ax^2$ и x^3 пренебрежимо малы по сравнению с $3a^2x$. Так как $a^3 = V$, то линейная температурная деформация бетона $\alpha_t = \Delta V / V$.

Применительно к рассмотренным выше примерам линейная деформация должна составлять при тепловом расширении твердой фазы $0,18/3 = 0,6\%$, или $0,6\text{ мм/м}$, при расширении твердой фазы и воды $0,78/3 = 0,26\%$, или $2,6\text{ мм/м}$. Приведенные на рис. 9.8 данные показывают, что на практике вследствие сопротивления структуры бетона деформации всегда меньше.

При охлаждении в бетоне возникают напряжения вследствие того, что образовавшаяся структура препятствует его температурному сжатию. В результате бетон не может уменьшиться до первоначальных размеров, а возникшие внутренние напряжения постепенно релаксируются, но оказывают некоторое влияние на его последующее твердение, несколько уменьшая прочность бетона, особенно при испытании сразу же после охлаждения, а также его усадку.

Пористость в процессе тепловой обработки увеличивается главным образом за счет капиллярных пор, так как поры геля, образующиеся при твердении цементного камня, обычно появляются и развиваются несколько позже, чем происходит основное расширение бетона при нагревании. Кроме того, дополнительный объем, необходимый для компенсации давления в порах геля, очень мал и обычно для этого вполне достаточно объема пор, возникающих при контракции цементного камня. Так как при пропаривании увеличивается объем капиллярных пор, то снижается морозостойкость и ухудшаются другие свойства бетона. Применение жестких закрытых форм, ограничивающих расширение бетона, способствует улучшению его качества.

Большое влияние на качество пропаренного бетона оказывает также процесс тепломассообмена при тепловлажностной обработке. В этих условиях в изделиях возникают градиенты температур и влажности, под действием которых влага и газообразная фаза перемещаются в бетоне, разрыхляя его структуру. В некоторых случаях (при неправильных режимах тепловой обработки) влага может испаряться из бетона, замедляя гидратацию цемента, оставляя сквозные капилляры, резко повышающие проницаемость бетона и ухудшающие его долговечность.

При тепловой обработке надо стремиться, чтобы градиенты температуры и влажности были минимальными или ниже предельных, при которых начинается заметная деструкция бетона. Значения предельных градиентов зависят от прочности структуры бетона к моменту начала нагрева и других факторов и могут определяться опытным путем. Уменьшению деструкции вследствие тепломассооб-

Таблица 9.8. Влияние условий тепловой обработки на степень развития деструктивных процессов (состав бетона 1:1,87:2,77; В/Ц=0,45)

Условия твердения	Теплофизический процесс		Прочность при сжатии*, МПа		Пористость в возрасте 28 сут. %
	тепловое расширение	внешний массообмен	1 сут	28 сут	
В термокомпенсированной закрытой форме, не изменяющей размеры при нагреве	Отсутствует		47,3 103	56,6 123	14,8
В закрытой форме	Ограничено во всех направлениях	Отсутствует	36,3 79	49,5 108	16,5
В открытой форме	Ограничено в двух направлениях	Имеется с одной поверхностью	31,3 68	44,5 97	17,6
В форме на поддоне	Не ограничено		18,0 39	26,6 53	24,8
В целлофановой пленке на поддоне	Не ограничено	Практически отсутствует	24,0 52	36,3 79	22
Твердение 28 сут при 20 °С в герметической форме	Практически отсутствует	Отсутствует	—	46,0 100	15,5

* В знаменателе—относительная прочность бетона.

мена способствует применение горячих бетонных смесей, когда изделия формируют из заранее разогретой до определенной температуры бетонной смеси.

Опыты подтверждают высказанные выше положения. В табл. 9.8 приведены данные Л. А. Малининой [41]. Образцы размером 7×7×7 см из тяжелого бетона на белгородском портландцементе пропаривались при 85 °С по режиму 1+6 ч, а затем остывали вместе с камерой. Прогрев начинали через 1 ч после изготовления образцов. Несколько более высокая прочность пропаренных без деформаций (первая строчка) образцов по сравнению с бетоном нормального твердения в возрасте 28 сут объясняется более глубокой гидратацией цемента при прогреве.

Опыты подтверждают большое влияние на структуру и прочность бетона его теплового расширения и тепломассообмена. Для ориентировочных расчетов можно принять, как и при нормальном твердении, что 1% увеличения пористости снижает прочность бетона в возрасте 28 сут на 5%.

Проведенный анализ поведения бетона при прогреве позволяет наметить технологические приемы, использование которых обеспечивает повышение качества бетона в условиях тепловой обработки.

Способы снижения влияния деструктивных процессов в бетоне при подъеме температуры

Тепловлажностная обработка в паровоздушной или паровой среде с избыточным давлением (в автоклавах и напорных пропарочных камерах)

Тепловая обработка в закрытых металлических формах

Пропаривание с подъемом температуры в прогрессивно возрастающем темпе или по ступенчатому графику так, чтобы внутренние напряжения не превышали прочности бетона в данное время

Предварительное выдерживание

Тепловлажностная обработка в среде с переменной относительной влажностью

Применение жестких хорошо уплотненных бетонных смесей и все способы ускорения твердения бетонов в начальный период прогрева (твердения)

Предварительный электро- и пароразогрев бетонной смеси до формирования изделий

Ограничение температуры нагрева (например, ниже 80 °С)

Создаваемое в паровоздушной среде давление уравнивает избыточное давление, возникающее в бетоне, препятствует его свободному расширению, уменьшает внутренний массоперенос, уплотняет структуру бетона в целом

Ограничивает свободное тепловое расширение бетона, устраняет внешний массообмен

Избыточное давление, образующееся в бетоне, компенсируется внутриобъемным вакуумом, возникающим напряжениям противодействует прочность сформировавшейся структуры бетона. В результате температурные деформации прогреваемого бетона не превышают температурных деформаций затвердевшего бетона

Приводит к развитию контракционных явлений и появлению начальной «критической» прочности бетона, что способствует сопротивлению бетона внутренним напряжениям, возникающим при нагреве, и их уменьшению

Уменьшает избыточное давление в бетоне, позволяет регулировать внешний и внутренний тепломассообмен

Ограничивает содержание воды и воздуха, ускоряет рост прочности бетона и возникновение контракционных явлений

Устраняет температурно-влажностный градиент по сечению изделия, ускоряет процессы гидратации цемента

Уменьшает расширение составляющих бетона, особенно газообразной фазы, которая резко возрастает после 80 °С, и тем самым снижает избыточное давление в бетоне и возникающее внутреннее давление

Наиболее распространенным видом тепловлажностной обработки является пропаривание бетона. Прочность бетона после пропаривания определяется режимом пропаривания, видом и активностью цемента и составом бетона. Обобщение опытных данных позволит установить приближенную зависимость прочности бетона, пропаренного при оптимальном режиме, от водоцементного отношения (табл. 9.9).

Цементы среднеалюминатные с высоким содержанием алита показывают относительную прочность на 0,5 выше предельных в табл. 9.9 значений. Проектирование состава бетона обычно проводят в предположении, что бетон после пропаривания набирает 70%

Таблица 9.9. Зависимость прочности пропаренного бетона от В/ТУ

В/Ц	Прочность бетона, % от его заданной средней прочности	
	через 4 ч после пропаривания	через 28 сут после пропаривания
	0,6 и более	60...65
0,4...0,5	65...70	95...105
Менее 0,4	70...85	100...110

от заданной прочности. Как показывает табл. 9.9, это может быть вполне достигнуто при правильном выборе режима твердения.

При необходимости получения после пропаривания 100%-ной прочности следует проектировать состав бетона более высокой средней прочности, что вызывает увеличение расхода цемента. Поэтому получение 100%-ной проектной прочности бетона должно назначаться только в исключительных случаях, например для наружных конструкций, изготавливаемых и вводимых в действие в зимний период.

ГЛАВА 10

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

§ 10.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЕДИНОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА БЕТОНА

В результате проектирования состава бетона должно быть определено такое соотношение между материалами, при котором будет гарантирована прочность бетона в конструкции с учетом технологии ее изготовления, необходимая подвижность бетонной смеси и экономичность бетона (минимальный расход цемента).

■ Проектирование состава бетона включает: а) назначение требований к бетону исходя из вида и особенностей службы и изготовления конструкций; б) выбор материалов для бетона и получение необходимых данных, характеризующих их свойства; в) определение предварительного состава бетона; г) проверку состава в пробных замесах; д) контроль за бетонированием; е) корректировку состава в процессе производства при колебаниях свойств заполнителя и других факторов.

Определение предварительного состава бетона производят на основе зависимости прочности бетона от активности цемента, цементно-водного фактора, качества используемых материалов и зависимости подвижности бетонной смеси от расхода воды и т. д.

Для получения уточненных зависимостей свойств бетона и бе-

Таблица 10.1. Требование к подвижности и жесткости бетонной смеси

Конструкции и способ уплотнения	Жесткость по вискозиметру, с		Подвижность, см
	стандартному	техническому	
Сборные железобетонные с немедленной распалубкой, формируемые на виброплощадках или с вибронасадком	30...10	120...40	—
Перекрытия с пустотами, стеновые панели, формируемые в горизонтальном положении на виброплощадках	10...5	40...20	1...4
Густоармированные элементы (колонны, ригели, плиты), изготавливаемые с применением наружного или внутреннего вибрирования	5...3	20...10	5...9
Формуемые на ударно-вибрационных установках	30...20	120...80	—
Формуемые в кассетах	10...5	—	7...14
Центрифугированные	10...5	—	5...10
Гидропрессованные (трубы)	10...5	40...20	—

тонной смеси от его состава, если имеется возможность, проводят предварительные испытания. При этом желательно использовать математические методы планирования эксперимента и обработки его результатов.

Требования к прочности бетона указывают в рабочих чертежах.

Подвижность (жесткость) бетонной смеси назначают в зависимости от размеров конструкции, плотности армирования, способов укладки и уплотнения (табл. 10.1).

При перекачивании бетонной смеси насосом осадка конуса должна быть 6...8 см.

Бетонная смесь обладает необходимой удобоукладываемостью только при содержании в ней достаточного количества цемента. Уменьшение количества цемента до определенных значений повышает опасность расслоения бетонной смеси и может привести к появлению в смеси микропустот и снижению прочности и долговечности бетона.

Минимальный расход цемента зависит от консистенции бетонной смеси и крупности заполнителя (табл. 10.2). Если при определении состава бетона окажется, что расход цемента, требуемый из условия получения заданной прочности, ниже указанных значений, то в расчет принимают минимальный расход цемента. Материалы для бетона выбирают в соответствии с рекомендациями, приведенными в гл. 2.

Для экономного расходования цемента необходимо, чтобы его марка по возможности превышала требуемую прочность бетона:

Прочность бетона, МПа	10	15	20	30	40	50
Марка цемента	300	400	400	500	600	600

Таблица 10.2. Минимальный расход цемента для получения нерасслаиваемой плотной бетонной смеси

Смесь	Минимальный расход цемента, кг/м ³ при предельной крупности заполнителя, мм			
	10	20	40	70
Особо жесткая (Ж=20 с)	160	150	140	130
Жесткая (Ж=10 ... 20 с)	180	160	150	140
Малоподвижная (Ж=5 ... 10 с)	200	180	160	150
Подвижная (ОК=1 ... 10 см)	220	200	180	160
Очень подвижная (ОК=10 ... 16 см)	240	220	210	180
Литая (ОК>16 см)	250	230	200	190

Примечание. Жесткость указана по стандартному вискозиметру.

При использовании для бетона более низких марок цемента требуется слишком большой его расход. Наоборот, когда марка цемента излишне высока, может оказаться, что расход цемента будет меньше минимальных значений, требуемых техническими условиями для получения бетона необходимой плотности. В этом случае для экономии цемента в бетон целесообразно вводить тонкомолотую добавку — активную кремнеземистую или инертную (золу, молотый кварцевый песок, известняковую муку и др.).

В качестве заполнителей бетона стремятся использовать, как правило, местные материалы или материалы из близко расположенных карьеров, но отбирают из них те, которые позволяют получать бетон с заданными свойствами при минимальных расходах цемента. Заданную подвижность бетонной смеси обеспечивают правильным назначением расхода воды, а прочность бетона — правильным назначением водоцементного отношения и расхода цемента.

Минимального расхода цемента добиваются правильным выбором содержания крупного и мелкого заполнителя. При определении их содержания раньше применяли ориентировочные рекомендации по выбору оптимального соотношения между песком и щебнем. В современных способах расчета обычно используют коэффициент раздвижки зерен щебня (гравия) раствором, который показывает, насколько объем раствора превышает объем пустот в щебне. Введение коэффициента позволило упростить определение состава бетона и сделать его более надежным, так как оптимальные значения, обуславливающие получение при прочих равных условиях бетона с минимальным расходом цемента, выбираются на основе зависимостей, вытекающих из физических основ структурообразования бетона. В этом случае расходы песка и щебня в тяжелом бетоне определяются по формулам, которые выводятся при решении системы двух уравнений:

$$(\frac{C}{\rho_c}) + B + (\frac{P}{\rho_p} + (\frac{Ш}{\rho_{ш}})) = 1000;$$

$$(\frac{C}{\rho_c}) + B + (\frac{P}{\rho_p}) = P_{ш} \alpha (\frac{Ш}{\rho'_{ш}}),$$

где C , B , P , $Ш$ — соответственно расходы цемента, воды, песка и щебня, кг/м³; ρ_c , ρ_p , $\rho_{ш}$ — истинные плотности цемента, песка и щебня, кг/л; $P_{ш}$ — пустотность щебня (относительная величина); α — коэффициент раздвижки зерен щебня раствором; $\rho'_{ш}$ — плотность щебня, кг/л.

Первое уравнение выведено из условия, что сумма абсолютных объемов компонентов бетона равна 1 м³ плотного бетона без вовлеченного воздуха, а второе — из условия, что цементно-песчаный раствор должен заполнить все пустоты между щебнем (в стандартно-рыхлом состоянии) с некоторой раздвижкой его зерен, что необходимо для получения удобообрабатываемой бетонной смеси и хорошего связывания зерен заполнителя в единый прочный монолит.

В этой системе уравнений два неизвестных: расход песка и щебня, так как расходы цемента и воды определяются в зависимости от прочности бетона и подвижности бетонной смеси, а коэффициент α назначается в соответствии с полученными экспериментальным путем рекомендациями, обеспечивающими наиболее разумное соотношение между песком и щебнем, при котором расход цемента оказывается минимальным.

Решением приведенной системы уравнений получают

$$Ш = 1000 / (\alpha P_{ш} / \rho'_{ш} + 1 / \rho_{ш}); \quad (10.1)$$

$$P = \rho_p (1000 - C / \rho_c - B - Ш / \rho_{ш}). \quad (10.2)$$

Для легких бетонов применяют другую систему уравнений, в которой второе уравнение выводится из условия получения бетона с заданной плотностью. При использовании в бетоне воздуховлекающих добавок в уравнение добавляют дополнительный член, учитывающий объем вовлеченного воздуха. Таким образом, окончательное определение расходов материалов в рассматриваемой методике производится с учетом абсолютных объемов, занимаемых материалами, и с учетом дополнительных требований, обеспечивающих экономичность бетона, или его плотность, или другие свойства.

При улучшении свойств бетона химическими добавками их влияние учитывают при определении расходов материалов путем введения соответствующих поправок в расчетные зависимости.

§ 10.2. ВЫБОР СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МЕЛКИМ И КРУПНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ

Одним из основных факторов, определяющих экономичность состава бетона (по расходу цемента), а также его высокое качество, является правильный выбор соотношения между мелким и крупным заполнителями $r = P / Ш$ (рис. 10.1).

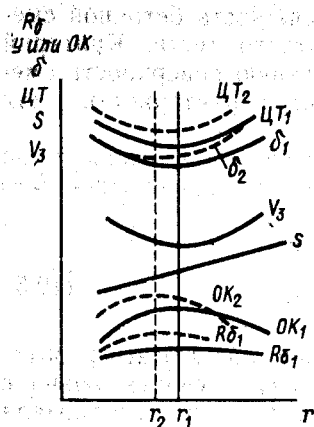


Рис. 10.1. Влияние соотношения r между песком и щебнем (гравием) на основные свойства бетона, бетонной смеси и смеси заполнителей:

ЦТ—абсолютный объем цементного теста; R_6 —предел прочности бетона; U или ОК—жесткость или подвижность бетонной смеси; V_3 —объем пустот в смеси заполнителя; s —суммарная поверхность заполнителя; R_1 и R_2 —оптимальные значения, соответствующие ЦТ₁, ЦТ₂, причем ЦТ₂ > ЦТ₁.

ных условиях обладает бетонная смесь, в которой цементное тесто лишь заполняет пустоты заполнителя. С дальнейшим увеличением содержания цементного теста подвижность бетонной смеси возрастает.

Толщина δ (м) слоя цементного теста между зернами заполнителя

$$\delta = (\text{ЦТ} - V_3) / s_{\text{см}}, \quad (10.3)$$

где ЦТ—содержание цементного теста, л; V_3 —объем пустот в заполнителе, л; $s_{\text{см}}$ —удельная поверхность смеси заполнителей, м²/л.

При увеличении удельной поверхности заполнителя подвижность бетонной смеси уменьшается даже при одинаковой толщине прослоек цементного теста. Подвижность бетонной смеси зависит от критерия

$$N = \delta / s_{\text{см}}, \quad \text{или} \quad N = (\text{ЦТ} - V_3) / s_{\text{см}}^2, \quad (10.4)$$

Пустотность смеси заполнителей при определенном r имеет минимальное значение. Удельная поверхность заполнителей уменьшается с уменьшением r . Подвижность бетонной смеси и прочность бетона при определенном r достигают максимума, причем наибольшая прочность, как правило, соответствует наибольшей подвижности бетонной смеси, так как при прочих равных условиях такая бетонная смесь укладывается наиболее плотно. Таким образом, оптимальное соотношение r имеет бетонная смесь наибольшей подвижности (наилучшей удобоукладываемости).

Подвижность, или удобоукладываемость, бетонной смеси зависит от многих факторов, главным из которых можно считать консистенцию цементного теста, т. е. соотношение между цементным тестом и заполнителем, между песком и щебнем (гравием).

При определенной консистенции цементного теста его влияние на внутреннее трение бетонной смеси и, следовательно, на ее подвижность будет определяться толщиной прослоек цементного теста между зернами заполнителя. Наибольшим внутренним трением или минимальной подвижностью при прочих равных

Чем больше критерий N , тем выше подвижность бетонной смеси при определенной консистенции цементного теста. Критерий можно определить, зная пустотность и удельную поверхность смеси заполнителя и вычисляя изменение этих характеристик для разных значений r .

При определении r объем пустот заполнителя вычисляют по формулам (2.2) и (2.3) после предварительного определения $V_{\text{п}} = rV_3 / (1+r)$ и $V_{\text{щ}} = V_3 - V_{\text{п}}$.

Удельная поверхность смеси заполнителей

$$s_{\text{см}} = (r_{\text{п}}s_{\text{п}} + s_{\text{щ}}) / (1+r), \quad (10.5)$$

где $s_{\text{щ}}$ вычисляют по формуле (2.7).

Вычисления проще производить, пользуясь абсолютными объемами материалов, применяя коэффициент Π_a и считая вначале $V_3 = 1$. Тогда объем пустот и удельная поверхность заполнителя при равном содержании цементного теста составят:

$$V_{\text{п.х}} = V_{\text{п}} V_{3.х}, \quad (10.6)$$

$$s_{\text{х}} = s_{\text{см}} V_{3.х}, \quad (10.7)$$

где $V_{3.х} = 1 - \text{ЦТ}$.

Таким образом, можно определить ориентировочные оптимальные значения r на основе критерия N . Это определение заключается в нахождении такого r , которому соответствует максимальное значение N или наибольшая подвижность бетонной смеси при данной консистенции цементного теста. Однако следует учитывать, что в действительности критерий r подчиняется несколько более сложной зависимости: с увеличением ЦТ уменьшается роль $s_{\text{см}}$ и возрастает роль δ , поэтому фактически оптимальные значения r при высоких значениях ЦТ (>320 л/м³) получаются несколько более высокими, чем по расчету.

На рис. 10.2 представлены результаты теоретического и опытного определения оптимального соотношения r для бетона на гранитном щебне и песке средней крупности. Опыт подтверждает результаты расчета. Соотношение r в бетоне не постоянно; с увеличением содержания цементного теста оптимальное значение r уменьшается, т. е. сокращается доля песка в смеси заполнителей.

Для бетонов низких и средних марок, для которых объем цемент-

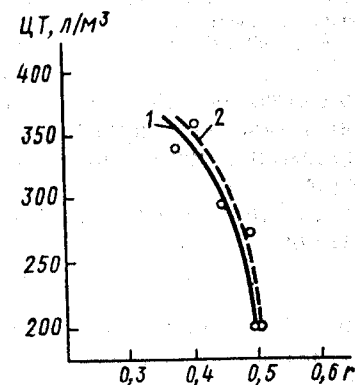


Рис. 10.2. Зависимость оптимального соотношения r между песком и щебнем (гравием) от расхода цементного теста на 1 м³ бетона:

1—опытная кривая; 2—расчетная кривая

ного теста не превышает 300 л/м³, наиболее пригодна смесь песка и щебня с минимальной пустотностью. В этом случае достигаются наибольшая толщина прослойки цементного теста и наименьшая подвижность бетонной смеси. В высокопрочных бетонах при высоких расходах цемента желательнее использовать смеси с меньшим содержанием песка. При применении в этом случае смесей с минимальной пустотностью в бетоне оказывается избыточное количество песка. В результате снижается подвижность бетонной смеси и для получения заданной подвижности требуется перерасход цемента.

В рассматриваемом методе определения состава бетона соотношение между песком и щебнем устанавливают с учетом коэффициента раздвижки α . Зная r , можно определить

$$\alpha = \frac{\text{ЦТ} \frac{\rho_n}{\rho_{\text{щ}}} \rho'_{\text{щ}} + 1000r\rho'_{\text{щ}}}{(1000 - \text{ЦТ})\rho_{\text{щ}}}. \quad (10.8)$$

Если $\rho_n = \rho_{\text{щ}}$, то формула (10.8) примет вид

$$\alpha = \frac{(\text{ЦТ} + 1000r)\rho'_{\text{щ}}}{(1000 - \text{ЦТ})\rho_{\text{щ}}}. \quad (10.9)$$

По этим формулам и по результатам опытов были определены ориентировочные значения α в бетоне на среднем и мелком песке (табл. 10.3).

Из табл. 10.3 видно, что оптимальные значения коэффициента α в пластичной бетонной смеси зависят от содержания в бетоне цементного теста и крупности песка: они возрастают с увеличением ЦТ и крупности песка. По другим опытам установлено, что оптимальный коэффициент α для жесткой бетонной смеси при расходе цемента 200 ... 400 кг/м³ равен 1,05 ... 1,15.

Физический смысл изменения коэффициента α в зависимости от состава бетона и консистенции бетонной смеси заключается в следующем. В жесткой бетонной смеси содержится относительно

небольшое количество цементного теста высокой вязкости, поэтому опасность водоотделения и расслоения отсутствует. В этих условиях наилучшая удобоукладываемость бетонной смеси и прочность бетона достигаются при минимальной раздвижке зерен щебня (гравия), так как при этом расход песка и суммарная площадь поверхности заполнителей являются также минимальными.

В результате зерна заполнителей укладываются наиболее плотно, обеспечивая хорошее качество бетона. С увеличением количества воды для придания бетонной смеси большей подвижности абсолютный объем цементного теста возрастает, а его вязкость понижается. Чтобы избежать водоотделения и расслоения бетонной смеси и обеспечить ее связанность, необходимо увеличить коэффициент α , сохраняя тем самым, а иногда даже увеличивая (при высоких значениях В/Ц) соотношение между песком и щебнем (гравием).

Необходимая величина изменений коэффициента α в зависимости от различных факторов была выявлена опытным путем. Установлено, что наиболее достоверной является зависимость коэффициента α от объема цементного теста в пластичной бетонной смеси. Зависимость коэффициента α от расхода цемента наблюдается только при сравнении бетонов с определенным водоцементным отношением (рис. 10.3), так как в этом случае увеличение расхода цемента приводит и к повышению содержания цементного теста в бетоне. Однако для приближенного определения состава бетона, если принять в расчет лишь его наиболее употребительные составы, можно установить увеличение коэффициента α в связи с повышением расхода цемента (см. пунктирную линию на рис. 10.3).

При постоянном расходе цемента увеличение водоцементного отношения ведет к увеличению расхода воды и объема цементного теста и соответственно к повышению оптимальных значений коэффициента α . Вид и нормальная густота цемента практически не влияют на оптимальные значения коэффициента α .

Подвижность пластичной бетонной смеси также не отражается на коэффициенте α , если абсолютный объем цементного теста при этом сохраняется постоянным.

Уменьшение крупности песка при прочих равных условиях вызывает уменьшение оптимальных значений α . Это объясняется тем, что более мелкие пески с повышенной удельной поверхностью обладают более высокой водоудерживающей способностью и позволяют

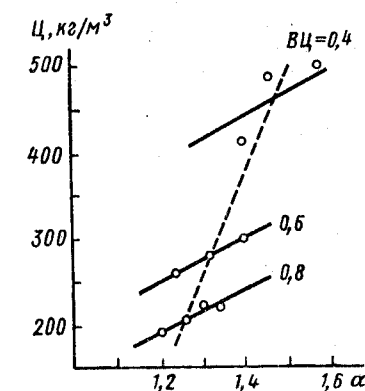


Рис. 10.3. Зависимость коэффициента раздвижки зерен α от расхода цемента Ц

Таблица 10.3. Расчетные и опытные значения коэффициента α

содержание цементного теста, л/м ³	Бетон на мелком песке		Бетон на среднем песке		
	значения α		содержание цементного теста, л/м ³	значения α	
	расчетные	действительные		расчетные	действительные
220	1,12	1,1	220	1,24	1,23
280	1,32	1,28	280	1,43	1,39
350	1,54	—	350	1,54	1,51

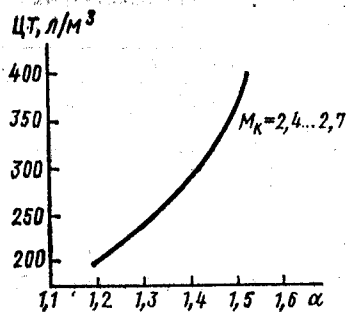


Рис. 10.4. Зависимость коэффициента раздвижки зерен α от расхода цементного теста на 1 м^3 бетона.

При уменьшении модуля крупности песка $M_{кр}$ на 1 коэффициент α уменьшается на 0,1...0,15, однако он не должен быть менее 1,1

коэффициента α , т. е. для бетона на щебне и гравии можно применять одинаковые значения α . Повышение содержания песка в смеси заполнителей при применении щебня объясняется тем, что при той же предельной крупности гравий, как правило, имеет меньшую пустотность, чем щебень. В результате при разных коэффициентах α в бетоне на гравии содержится меньше песка, чем в бетоне на щебне.

Введение в бетонную смесь химических добавок практически не изменяет оптимальных значений коэффициента α , если водоудерживающая способность бетонной смеси достаточна. Если же при введении пластификаторов и суперпластификаторов получают литые бетонные смеси и возникает опасность их расслоения, то коэффициент α повышают, чтобы увеличить содержание песка и улучшить водоудерживающие свойства смеси. При введении воздухововлекающих добавок как бы увеличивается объем цементного теста за счет мельчайших пор вовлеченного воздуха, что необходимо учитывать, несколько увеличивая оптимальные значения α или назначая α исходя из суммарного объема, занимаемого цементным тестом и вовлеченным воздухом.

Приведенные результаты исследований, установившие влияние различных факторов на коэффициент α , показывают, что для жестких бетонных смесей при расходе цемента менее 400 кг/м^3 α следует принимать 1,05...1,15 (в среднем 1,1). Меньшее значение принимают в случае использования мелких песков. Для жирных составов жестких смесей ($\text{Ц} > 400 \text{ кг/м}^3$) коэффициент α назначают по графику (рис. 10.4), при этом уменьшают его значение на 0,05...0,1.

Для пластичных бетонных смесей оптимальные значения коэф-

получать связанную и нерасслаиваемую бетонную смесь при меньшем расходе песка.

Крупность щебня влияет на коэффициент α незначительно, что позволяет не учитывать этот фактор при выборе оптимальных значений коэффициента α . Однако даже при постоянном α и расходе щебня в бетоне будет зависеть от его крупности: с увеличением предельной крупности он будет возрастать, так как будет, как правило, повышаться плотность щебня. Соответственно будут уменьшаться значения α и расход песка в бетоне.

Форма зерен крупного заполнителя практически не влияет на оптимальные значения коэффициента

Таблица 10.4. Оптимальные значения коэффициента α для пластичных бетонных смесей ($B_n = 7\%$)

Расход цемента, кг/м^3	Оптимальные значения коэффициента α при В/Ц				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	—	—	1,26	1,32	1,38
300	—	1,3	1,36	1,42	—
350	1,32	1,38	1,44	—	—
400	1,4	1,46	—	—	—
500	1,5	1,56	—	—	—

Примечания: 1. При других значениях Ц и В/Ц коэффициент α находят интерполяцией.

2. При использовании мелкого песка с водопотребностью более 7% коэффициент α уменьшают на 0,3 на каждый процент увеличения водопотребности песка. Если применяется крупный песок с $B_n < 7\%$, коэффициент α увеличивают на 0,03 на каждый процент уменьшения B_n .

коэффициента α наиболее точно могут быть установлены на основе зависимости $\alpha = f(\text{ЦТ})$ (рис. 10.4). Для расчетов более удобно использовать данные табл. 10.4, при определении которых зависимость $\alpha = f(\text{ЦТ})$ была преобразована в зависимость $\alpha = f(\text{Ц}, \text{В/Ц})$, более удобную для использования в расчетах. В табл. 10.4 приведены также рекомендации по введению поправок, учитывающих крупность песка.

Незначительные отклонения коэффициента α от оптимального значения практически не сказываются на свойствах бетона и бетонной смеси, поэтому его отклонения на $\pm 0,05$ при определении состава бетона вполне допустимы. В особых случаях коэффициент α определяют, исходя не только из условий получения определенной прочности бетона и подвижности бетонной смеси, но с учетом дополнительных требований. В этих случаях возможна корректировка коэффициента α . Например, для бетона тонкостенных конструкций или для декоративных бетонов несколько увеличивают коэффициент α , чтобы гарантировать хороший внешний вид лицевых поверхностей бетона.

При необходимости оптимальные значения коэффициента α можно устанавливать по результатам определения подвижности бетонной смеси, которая наиболее показательно откликается на изменения коэффициента α .

§ 10.3. ПОРЯДОК РАСЧЕТА СОСТАВА БЕТОНА

Состав бетонной смеси выражают двумя способами: 1. Соотношением по массе между цементом, песком и гравием (или щебнем) с обязательным указанием водоцементного отношения и активности цемента. Количество цемента принимают за 1, поэтому соотношение между составными частями бетона записывают в виде $1 : x : y$ с указанием В/Ц (например, 1 : 2 : 4 по массе при

$V/C=0,6$). 2. Расходом материалов по массе (кг) на 1 м^3 уложенной и уплотненной бетонной смеси, например: цемента — 280; песка — 700; щебня — 1250; воды — 170; итого — 2400.

Различают лабораторный состав бетона, устанавливаемый для сухих материалов, и производственный (полевой) — для материалов в естественно-влажном состоянии. Лабораторный состав бетона определяют расчетно-экспериментальным путем. Состав бетона предварительно рассчитывают по абсолютным объемам, используя формулы для определения расхода воды, цемента, песка и щебня (гравия), выведенные на основании рассмотренных выше зависимостей, а затем уточняют пробными затворениями.

■ Порядок расчета состава бетона следующий:

1. Определяют V/C (или C/V) в зависимости от требуемой прочности, срока и условий твердения бетона. Водоцементное или цементно-водное отношение находят путем предварительных опытов, устанавливающих зависимость прочности бетона от этого фактора и активности цемента (с применением местных заполнителей) или ориентировочно по формулам:

а) для обычного бетона при $V/C > 0,4$

$$V/C = AR_{ц} / (R_б + A \cdot 0,5R_{ц}); \quad (10.10)$$

б) для высокопрочного бетона при $V/C < 0,4$

$$V/C = A_1 R_{ц} (R_б - A_1 \cdot 0,5R_{ц}). \quad (10.11)$$

Значения коэффициентов A и A_1 берут из табл. 5.2 либо находят C/V по графикам (рис. 10.5). Формулу (10.10) следует применять, если $R_б < 2AR_{ц}$, в других случаях надо пользоваться формулой (10.11).

При расчете состава бетона иногда необходимо учитывать требования к нему по морозостойкости, водонепроницаемости, проч-

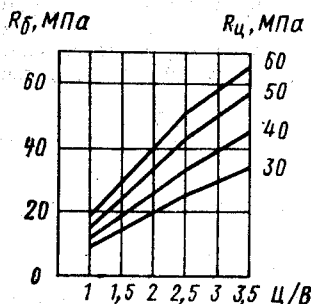


Рис. 10.5. График для нахождения C/V в зависимости от требуемой прочности бетона $R_б$ и активности цемента $R_ц$

ности на растяжение при изгибе и пр. В этом случае для назначения V/C используют соответствующие зависимости, примеры которых приведены далее, но способ определения состава бетона в принципе сохраняется.

2. Определяют расход воды в зависимости от требуемой подвижности бетонной смеси на основании результатов предварительных испытаний или ориентировочно по графикам на рис. 3.32. При этом необходимо учитывать водопоглощение крупного заполнителя, если оно более 0,5% по массе. Графики на рис. 3.32 составлены для расхода цемента до 400 кг/м^3 с применением гравия и

песка средней крупности с водопотребностью 7%. В случае использования других заполнителей необходимо вносить соответствующие поправки, указанные в примечании к графикам.

3. Определяют расход цемента:

$$C = B : V/C. \quad (10.12)$$

Если расход цемента на 1 м^3 бетона окажется ниже допустимого по СНиПу (см. табл. 10.2), то следует увеличить его до требуемой нормы или ввести тонкомолотую добавку. Последнюю применяют в случае, если активность цемента слишком высока для бетона данной марки.

4. Устанавливают коэффициент раздвижки α для пластичных бетонных смесей по графику (см. рис. 10.4) в зависимости от количества цементного теста и крупности песка или выбирают его значение по табл. 10.4.

5. Определяют расход щебня или гравия по формуле (10.1).

6. Определяют расход песка по формуле (10.2).

7. Проверяют на пробных замесах подвижность (осадку конуса) или жесткость бетонной смеси, при необходимости вносят поправки в расчет состава бетона. Если применяют воздухововлекающие добавки, то количество вовлеченного воздуха учитывают при подсчете расхода песка.

Современная технология отличается большим разнообразием требований к бетону, материалов для бетона и технологических приемов приготовления и укладки бетонной смеси. Однако нет необходимости создавать для каждого случая свой метод расчета.

Расчет состава обычного тяжелого бетона должен выполняться по рассмотренной методике. Специфические требования к бетону и материалам для него надо учитывать путем введения соответствующих поправок.

Пример 10.1. Определить состав бетона при заданной средней прочности 30 МПа с подвижностью бетонной смеси по осадке конуса 4...5 см. Материалы: портландцемент активностью 37,5 МПа, песок средней крупности с водопотребностью 7% и истинной плотностью 2,63 кг/л; гранитный щебень с предельной крупностью 40 мм, истинной плотностью 2,6 кг/л.

1. По формуле (10.10), $V/C = 0,6 \cdot 37,5 / (30 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 37,5) = 0,54$.

2. По графикам на рис. 3.32 ориентировочный расход воды составляет 178 л/м^3 .

3. По формуле (10.12), $C = 178 / 0,54 = 330 \text{ кг/м}^3$.

4. Пустотность щебня $P_{щ} = 1 - (\rho/\rho') = 1 - 1,48/2,6 = 0,43$. По табл. 10.4, коэффициент раздвижки $\alpha = 1,38$ (по интерполяции).

5. По формуле (10.1), $Щ = 1000 / (0,43 \cdot 1,38 / 1,48 + 1/2,6) = 1270 \text{ кг/м}^3$.

6. По формуле (10.2), $П = (1000 - 330/3,1 - 178 - 1270/2,6) \cdot 2,63 = 600 \text{ кг/м}^3$. Плотность бетонной смеси равна $330 + 178 + 1270 + 600 = 2378 \text{ кг/м}^3$. Состав проверяют и при необходимости уточняют на пробных замесах.

Пример 10.2. Определить состав при заданной средней прочности 30 МПа при жесткости бетонной смеси 20 с. Материалы те же, что в примере 10.1.

1. По формуле (10.10), $V/C = 0,6 \cdot 37,5 / (30 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 37,5) = 0,54$.

2. По графику на рис. 3.32 ориентировочный расход воды составляет 130 л/м^3 .

3. По формуле (10.12), $\Pi = 130/0,54 = 240 \text{ кг/м}^3$.
4. Коэффициент раздвижки для жесткой бетонной смеси при умеренном расходе цемента $\alpha = 1,1$.
5. По формуле (10.1), $\Pi = 1000/(0,43 \cdot 1,1/1,48 + 1/2,6) = 1420 \text{ кг/м}^3$.
6. По формуле (10.2), $\Pi = (1000 - 240 \cdot 3,1 - 130 - 1420/2,6) \cdot 2,63 = 625 \text{ кг/м}^3$.
- Расчетная масса бетонной смеси $240 - 130 + 1420 + 625 = 2415 \text{ кг/м}^3$.
- Сравнив составы бетона в примерах 10.1 и 10.2, видим, что применение жесткой бетонной смеси обеспечивает заметную экономию цемента $330 - 240 = 90 \text{ кг/м}^3$, что приблизительно составляет 27%.

§ 10.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СОСТАВА БЕТОНА

Для экспериментальной проверки состава бетона изготавливают пробную порцию бетонной смеси и определяют ее подвижность. Вследствие особенностей свойств применяемого цемента и местного заполнителя осадка конуса или жесткость бетонной смеси может отличаться от заданной.

Предположим, что в примере 10.1 осадка конуса оказалась равной 0, т. е. смесь недостаточно подвижна. Для увеличения подвижности повышают расход воды примерно на 5...10%. Одновременно прибавляют 5...10% цемента для того, чтобы не изменилось водоцементное отношение. Снова перемешивают бетонную смесь, измеряют осадку конуса и так до тех пор, пока не получают требуемых показателей.

Если при первом измерении подвижность бетонной смеси превышает заданную (например, ОК-8 см вместо 4...5 см), то добавляют небольшое количество песка и щебня (по 5...10%). Затем уточняют состав бетона, так как первоначальный объем бетонной смеси увеличивается. Для этого определяют фактическую плотность бетонной смеси при способе уплотнения, принятом в производственных условиях. Испытание проводят следующим образом: пустую форму взвешивают, проверяют ее внутренние размеры, заполняют смесью, уплотняют и вновь взвешивают.

Плотность уплотненной бетонной смеси (кг/л)

$$\rho'_{\text{б.см}} = (m_2 - m_1)V_{\text{ф}}, \quad (10.13)$$

где m_1 и m_2 — масса пустой формы и формы с бетоном, кг; $V_{\text{ф}}$ — внутренний объем формы, л.

Полученное значение плотности бетонной смеси должно совпадать с расчетным (допускаемое отклонение $\pm 2\%$).

Далее устанавливают фактический объем полученной бетонной смеси в пробном замесе:

$$V_{\text{ф}} = \Sigma m / \rho'_{\text{ф}},$$

где Σm — сумма масс материалов, израсходованных на пробный замес, кг; $\rho'_{\text{ф}}$ — фактическая плотность уплотненной бетонной смеси, кг/л.

Зная объем полученной бетонной смеси и расход материалов на пробный замес, определяют фактический объем материалов на 1 м^3 бетона.

Объем пробного замеса зависит от числа образцов. Если для определения класса бетона готовят по три образца, то принимают следующий минимальный объем замеса:

Размер ребер образца, см	30	20	15	10
Объем пробного замеса, л	85	25	12	6

Применительно к условиям примера 10.1 необходимо принять размер контрольных образцов $15 \times 15 \times 15$ см (более $3D_{\text{пр}}$ щебня), следовательно, объем замеса будет 12 л. Расход материалов на 1 замес составит:

$$\Pi = 330 \cdot 0,012 = 3,96 \text{ кг}; \quad \text{П} = 600 \cdot 0,012 = 7,2 \text{ кг}; \quad \text{Щ} = 1770 \cdot 0,012 = 15,25 \text{ кг};$$

$$B = 1780 \cdot 0,12 = 2,14 \text{ л.}$$

При использовании щебня нескольких фракций следует определить расход каждой фракции исходя из оптимального соотношения между ними. Если для получения требуемой подвижности пришлось увеличить количество цемента и воды на 10%, то окончательный расход материалов на замес составит:

$$\Pi = 3,96 + 0,4 = 4,36 \text{ кг}; \quad \text{П} = 7,2 \text{ кг}; \quad \text{Щ} = 15,25 \text{ кг}; \quad B = 2,35 \text{ л} (2,14 + 0,21).$$

Всего 29,16 кг.

Предположим, что действительная плотность бетонной смеси оказалась 2350 кг/м^3 , или $2,35 \text{ кг/л}$. Тогда объем замеса $V_{\text{ф}} = 29,16/2,35 = 12,4 \text{ л}$.

Фактический расход материалов на 1 м^3 бетона будет равен: $\Pi = 4,36/0,0124 = 350 \text{ кг}; \quad B = 190 \text{ л}; \quad \text{П} = 580 \text{ кг}; \quad \text{Щ} = 1230 \text{ кг}$.

Из откорректированной бетонной смеси готовят контрольные образцы и затем их испытывают. На каждый срок испытания изготавливают не менее трех образцов. Образцы формируют в разборных чугунных или стальных (строганных) формах. Размеры их необходимо строго выдерживать, не допуская отклонения более $\pm 1\%$ по граням. Углы между гранями должны составлять $(90 \pm 2)^\circ$. Приемы укладки и уплотнения образцов должны соответствовать принятым на производстве. Укладку бетонной смеси в формы следует заканчивать не позднее чем через 30 мин после ее приготовления.

При уплотнении бетонной смеси вибрированием форму заполняют с некоторым избытком, после чего ее вибрируют на лабораторной площадке (частота колебаний 50 Гц, амплитуда колебаний вибратора под нагрузкой 0,5 мм). Лабораторную виброплощадку можно заменить поверхностным вибратором. Продолжительность вибрирования должна определяться в соответствии с показателем жесткости $t = (6 \dots 8) \text{ Ж}$, но не менее $\text{Ж} + 30$ с.

Образцы в течение 2 сут хранят в формах в помещении с температурой $16 \dots 20^\circ \text{C}$, затем освобождают из форм, маркируют и до момента испытания хранят в камере с влажностью около 100% или в периодически смачиваемых песке, опилках и т. д. Перед испытанием тщательно осматривают образцы, измеряют грани (с точностью до 1 мм), взвешивают.

При испытании прочности образец укладывают на нижнюю опорную плиту боковыми гранями. Предел прочности при сжатии бетона вычисляют с точностью до 0,1 МПа, как среднее арифметическое результатов испытания трех образцов при условии, что наименьший результат отличается не более чем на 20% от ближайшего показателя. При превышении этой разницы более чем на 20% вычисление производят по двум наибольшим результатам.

Если действительная прочность бетона при сжатии отличается от заданной более чем на $\pm 15\%$, то следует внести коррективы в состав бетона: для повышения прочности увеличивают расход цемента (т. е. Π/B), для снижения прочности — уменьшают его.

§ 10.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СОСТАВА БЕТОНА

На производстве часто применяют при приготовлении бетона влажные заполнители. Количество влаги, содержащейся в заполнителях, должно учитываться при определении действительного расхода воды. В этом случае производят корректировку состава.

Вначале определяют содержание воды в заполнителях по формулам

$$V_n = \Pi W_n; \quad (10.14)$$

$$V_{щ} = \text{Щ} W_{щ}, \quad (10.15)$$

где W_n , $W_{щ}$ — влажность песка и щебня (гравия).

Затем устанавливают действительный расход воды:

$$V_d = V - V_n - V_{щ}.$$

Поскольку часть массы влажных заполнителей составляет вода, необходимо увеличить их массу, чтобы обеспечить поступление в бетон полученной расчетом массы твердого материала. Расход песка и щебня увеличивают на массу воды, которая в них содержится, т. е. их расход в производственном составе будет соответственно равен $\Pi_d = \Pi + V_n$ и $\text{Щ}_d = \text{Щ} + V_{щ}$.

Расход цемента при данной корректировке состава сохраняется неизменным.

Если для условий примера 10.1 принять, что влажность песка 3% и щебня 1%, то содержание воды в песке $V_n = 600 \cdot 0,03 = 18$ л; то же, в щебне $V_{щ} = 127 \cdot 0,01 = 12,7$ л; всего $30,7 \approx 31$ л.

Для сохранения V/C и заданной прочности бетона расход воды, полученный при расчете, для сухих заполнителей уменьшают, а сухой песок и гравий соответственно заменяются влажными. Тогда расход материалов в производственном составе бетонной смеси будет следующий: $C = 330$ кг; $\Pi = 600 + 18 = 618$ кг; $\text{Щ} = 1270 + 13 = 1283$ кг; $V = 177 - 31 = 146$ л. Всего 2377 кг.

Плотность бетонной смеси не изменяется.

При загрузке цемента и заполнителя в бетоносмеситель их первоначальный объем больше объема получаемой бетонной смеси, так как при перемешивании происходит как бы уплотнение массы: зерна цемента располагаются в пустотах между зернами песка, зерна песка — между зернами щебня. Для оценки объема получаемой бетонной смеси используют так называемый коэффициент выхода бетона β_6 :

$$\beta_6 = \frac{1000}{C/\rho'_c + \Pi/\rho'_n + \text{Щ}/\rho'_щ}, \quad (10.16)$$

где ρ'_c , ρ'_n , $\rho'_щ$ — плотность цемента, песка и щебня.

Влияние воды при определении коэффициента выхода бетона не учитывают, так как вода сразу же проливается в пустоты твердых материалов и на их первоначальный объем не влияет. Однако при определении коэффициента β_6 для производственного состава используют плотность влажных заполнителей, так как последняя может заметно отличаться, особенно для песка, от плотности сухих заполнителей. Коэффициент выхода бетона зависит от состава бетона и свойств используемых материалов и колеблется от 0,55 до 0,75.

При расчете расхода материалов на один замес бетоносмесителя принимают, что сумма объемов цемента, песка и щебня (в рыхлом состоянии) соответствует емкости барабана бетоносмесителя. Тогда объем бетона V_3 , получаемый из одного замеса,

$$V_3 = \beta_6 V_{6c}, \quad (10.17)$$

где V_{6c} — емкость бетоносмесителя.

Расход материалов на замес бетоносмесителя определяют с учетом получаемого объема бетона ($C_3 = C V_3$ и т. д.).

Для рассмотренного выше примера, если $\rho_{в,п} = 1,65$ и $\rho_{в,щ} = 1,48$ кг/дм³, получим

$$\beta_6 = \frac{1000}{\frac{330}{1,3} + \frac{618}{1,65} + \frac{1283}{1,48}} = 0,67.$$

Для бетоносмесителя с емкостью барабана 500 л выход бетона из одного замеса составит $500 \cdot 0,67 = 335$ л, или 0,335 м³.

Расход материалов на один замес составит: $C = 330 \cdot 0,335 = 110$ кг; $\Pi = 618 \cdot 0,335 = 207$ кг; $\text{Щ} = 1283 \cdot 0,335 = 430$ кг; $V = 146 \cdot 0,335 = 49$ л. Состав бетона можно выразить также в виде соотношения 1 : x : y, т. е. (330/330) : (618/330) : (1283/330) = 1 : 1,87 : 3,89.

Для уточнения расчетных формул, особенно при больших объемах бетонных работ, рекомендуется предварительно испытать бетон и бетонную смесь, приготовленную на предназначенных к применению материалах, выдерживая образцы в условиях, соответствующих производственным. При использовании уточненных зависимостей для прочности бетона и подвижности бетонной смеси можно назначать состав бетона без экспериментальной проверки с последующей его корректировкой, если это требуется по результатам испытания кон-

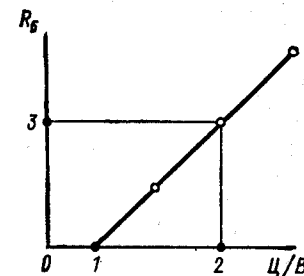


Рис. 10.6. Построение зависимости $R_6 = f(C/V)$ по результатам предварительных испытаний

трольных образцов, приготовленных при бетонировании конструкции или сооружения.

Если ожидается применение одного-двух классов бетона, достаточно изготовить три пробных замеса с тремя значениями В/Ц, например 0,4; 0,55 и 0,7. Необходимо, чтобы диапазон значений В/Ц предполагал получение бетона прочностью на 15 ... 20 % ниже и выше заданных классов. Подвижность бетонной смеси подбирают в соответствии с заданием. Состав бетона для пробных затворений рассчитывают обычными методами.

По результатам испытаний, проведенных в заданные сроки, строят график зависимости прочности бетона от Ц/В при данном цементе или уточняют коэффициенты А и С в формулах (5.9), (5.10), (10.10) и (10.11). Например, если результаты предварительных испытаний для бетона средней прочности 20 МПа нанести на график (рис. 10.6), то коэффициент С будет соответствовать отрезку [O1], а коэффициент А — отношению ординаты к абсциссе при любом значении последней: $A = [O3]/[O2]$.

§ 10.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА БЕТОНА ПО ГРАФИКАМ И НОМОГРАММАМ

На практике из одних и тех же материалов обычно приходится готовить бетоны различных классов с разной консистенцией бетонной смеси. При этом число составов может достигать нескольких десятков. В этом случае нецелесообразно проводить предварительные испытания для каждого класса бетона, рациональнее провести испытания, позволяющие построить обобщенные зависимости, связывающие прочность, подвижность, водоцементное отношение и расход цемента. Тогда объем предварительных испытаний резко сокращается.

Наиболее часто для построения обобщенных зависимостей проводят испытания девяти серий образцов. При этом принимают три расхода цемента и три значения водоцементного отношения. Изменение водоцементного отношения при постоянном расходе цемента изменяет содержание воды в бетонной смеси и тем самым изменяет ее подвижность. В результате таких испытаний получают бетонную смесь разной подвижности и бетоны разной прочности. Матрица результатов испытаний представлена в табл. 10.5.

По этим результатам можно построить графики, по которым производят определение составов бетона при любом заданном значении жесткости бетонной смеси и прочности бетона. При проведении опытов принимают такие крайние значения водоцементных отношений и расходов цемента, которые обеспечивают получение результатов, полностью перекрывающих весь диапазон возможных на данном производстве классов бетона и подвиж-

Таблица 10.5. План и результаты испытания различных составов бетона

Серия	Расход цемента, кг/м ³	В/Ц	Жесткость бетонной смеси, с	Прочность бетона на сжатие, МПа	Серия	Расход цемента, кг/м ³	В/Ц	Жесткость бетонной смеси, с	Прочность бетона на сжатие, МПа
1	Ц ₁	В/Ц ₁	Ж ₁	R ₁	6	Ц ₃	В/Ц ₃	Ж ₆	R ₆
2	Ц ₁	В/Ц ₂	Ж ₂	R ₂	7	Ц ₃	В/Ц ₁	Ж ₇	R ₇
3	Ц ₁	В/Ц ₃	Ж ₃	R ₃	8	Ц ₃	В/Ц ₂	Ж ₈	R ₈
4	Ц ₂	В/Ц ₁	Ж ₄	R ₄	9	Ц ₃	В/Ц ₃	Ж ₉	R ₉
5	Ц ₂	В/Ц ₂	Ж ₅	R ₅					

ности бетонной смеси. Определение состава бетона для пробных замесов проводят по рассмотренной выше методике.

На графиках рис. 10.7 приведена зависимость жесткости бетонной смеси от водоцементного отношения и расхода цемента. По результатам испытаний строят три кривые $Ж = f(V/C)$ для трех расходов цемента. При необходимости по интерполяции можно построить дополнительные кривые для других расходов цемента. Для зависимости прочности бетона от водоцементного отношения также вначале по результатам опытов строят три кривые, которые при необходимости могут быть дополнены кривыми для других значений расхода цемента (рис. 10.8).

На основе полученных графических зависимостей для жесткости бетонной смеси и прочности бетона от водоцементного отношения и расхода цемента можно построить обобщенный гра-

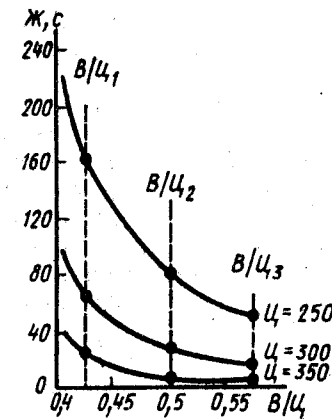


Рис. 10.7. Зависимость жесткости бетонной смеси по техническому вискозиметру от водоцементного отношения и расхода цемента

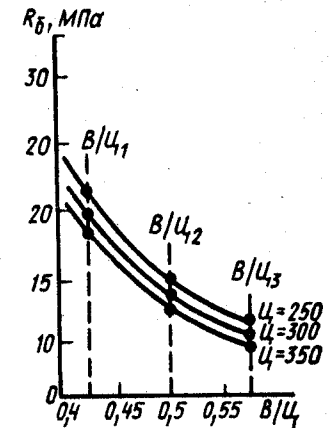


Рис. 10.8. Зависимость прочности бетона от водоцементного отношения и расхода цемента

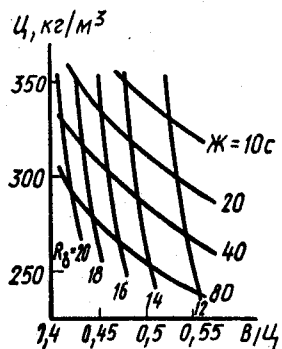


Рис. 10.9. Зависимость прочности бетона от водоцементного отношения, расхода цемента и жесткости по техническому вискозиметру

фик, устанавливающий зависимость свойств бетона и бетонной смеси от ее состава. На графике рис. 10.9 приведены кривые, показывающие бетонные смеси с одинаковой жесткостью и бетон с одинаковой прочностью при различных расходах цемента и водоцементного отношения. При определении состава бетона по этому графику находят точку пересечения линий «изожесткости» и «изопрочности», соответствующих заданной жесткости бетонной смеси и прочности бетона, и принимают водоцементное отношение и расход цемента, которые соответствуют этой точке. В этом случае будет обеспечено получение бетона данной прочности при заданной подвижности бетонной смеси.

Для определения состава бетона могут использоваться и другие графики и номограммы, построенные по результатам предварительных испытаний, выполняемых как по простейшему плану эксперимента, рассмотренному выше, так и по более сложным планам с построением соответствующих математических моделей (см. гл. 20).

§ 10.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА БЕТОНА С ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

С каждым годом расширяется номенклатура добавок, используемых для улучшения свойств бетонной смеси и бетона. Однако это не требует применения для каждого вида добавок особых методов проектирования его состава. Определение состава бетона в этом случае производят на основе единой методики, рассмотренной выше, с учетом влияния добавок на основные зависимости состав — свойство, используемые в расчетах. При этом учитывают, что добавки не изменяют характера зависимостей, в частности зависимостей подвижности бетонной смеси от расхода воды и прочности бетона, от активности цемента и цементно-водного отношения, а только изменяют количественное соотношение между разными факторами. Величина подобных изменений зависит от дозировки добавки и может быть учтена на основе рекомендаций, содержащихся в технических условиях, или инструкции по применению данной добавки либо установлена по результатам предварительных опытов.

На рис. 10.10 показано влияние добавок пластификатора и суперпластификатора на зависимость подвижности бетонной смеси от расхода воды. Введение добавок способствует повышению подвижности смеси, уменьшает расход воды, необходимый для

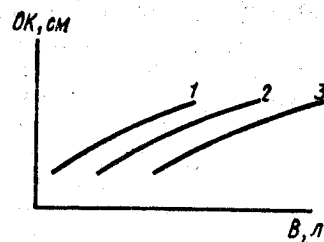


Рис. 10.10. Влияние добавок на водопотребность бетонной смеси:

1 — бетонная смесь с суперпластификатором; 2 — то же, с СДБ; 3 — то же, без добавок

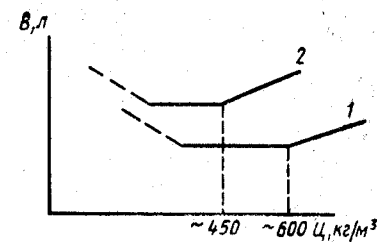


Рис. 10.11. Влияние суперпластификатора на зависимость водопотребности бетонной смеси от расхода цемента:

1 — бетонная смесь с суперпластификатором; 2 — без добавок

получения равноподвижных смесей, однако основная зависимость $OK=f(V)$ имеет одинаковый характер и в обычном бетоне, и в бетоне с добавками. Изменяются только положение кривой и соответственно получаемые по ней количественные результаты. Если известно, что добавка уменьшает водопотребность бетонной смеси на 10 или 20 %, то можно построить соответствующие кривые и по ним определять расход воды, требуемый для получения заданной подвижности смеси.

При введении комплексных добавок влияние их на водопотребность бетонной смеси можно оценивать по виду и дозировке пластифицирующего компонента. При введении ускорителей твердения ориентировочно считают, что зависимость подвижности смеси от расхода воды в этом случае не изменяется, и расход воды определяют по рекомендациям для обычного бетона без добавки.

В бетонной смеси при расходе цемента 200 ... 450 кг изменение содержания цемента практически так мало сказывается на изменении водопотребности, что этим влиянием пренебрегают. В этом случае говорят о законе постоянства водопотребности бетонной смеси. Введение пластификаторов и суперпластификаторов не нарушает этой закономерности, но изменяет количественное значение водопотребности и пределы, в которых проявляется эта зависимость (рис. 10.11). Введение этих добавок не только уменьшает водопотребность бетонной смеси, но и смещает верхний предел в сторону больших расходов цемента, т. е. закон постоянства водопотребности бетонных смесей сохраняется при введении пластификаторов до расхода цемента 500 ... 550 кг/м³, а при введении суперпластификатора до 550 ... 600 кг/м³, поэтому при высоких расходах цемента в этом случае не надо вводить дополнительную дозу цемента, которая рекомендована для бетонов без добавок.

Таблица 10.6. Влияние содержания суперпластификатора и минералогического состава цемента на эффективность его действия

Условная группа цемента	Содержание в цементе, %		Среднее уменьшение расхода воды в равноподвижных смесях при дозировке суперпластификатора, %			
	C ₈ S	C ₈ A	0,5	0,75	1	1,25
1	49	6	18	23	28	33
2	40	7...8	17	22	27	32
3	33	10	15	19	24	29

Эффект воздействия суперпластификатора на бетонную смесь зависит от количества введенной добавки и минералогического состава цемента (табл. 10.6). Однако влияние второго фактора невелико и может быть учтено соответствующей корректировкой содержания добавки: при применении алюминатных цементов дозировка добавки увеличивается на 0,1 ... 0,2 % от массы цемента.

Сравнение пластифицирующего действия на бетонную смесь различных суперпластификаторов показало, что оно приблизительно одинаково. Например, при содержании добавки 1 % массы цемента и расходе цемента 500 кг/м³ снижение водопотребности (величина редуцирования воды ΔВ) для разных добавок колебалась от 23 до 25 %.

При определении состава для пробных замесов можно принимать средние значения ΔВ, которые зависят от дозировки суперпластификатора: при дозировке 0,5 % от массы цемента расход можно уменьшить на 15 %, а каждое последующее увеличение дозировки на 0,25 % снижает расход воды еще на 4 ... 5 %.

При введении в бетонную смесь СДБ или добавок подобного класса, т. е. близких по эффекту воздействия, для расчета ориентировочно можно использовать данные табл. 3.3 или применять условное среднее значение ΔВ=10 % с последующим уточнением этого значения опытным путем. При улучшении пластифицирующих свойств СДБ посредством модификации ее щелочами или полимерными добавками (добавки ХДСК или ЛСТМ) значение ΔВ повышается до 12 ... 15 %. Для воздухововлекающих добавок ΔВ составляет 3 ... 7 %.

Влияние добавок на водопотребность бетонной смеси можно учесть коэффициентом k_1 , который показывает, насколько уменьшается в бетонной смеси с добавкой расход воды V_1 , требуемый для получения заданной подвижности, по сравнению с обычной бетонной смесью. Расход воды $V_1 = k_1 V$. Если известна величина снижения водопотребности бетонной смеси с добавкой В (%), то $k_1 = (100 - \Delta В) / 100$, например если при введении в бетонную смесь добавки СДБ принять $\Delta В \approx 10 \%$, то $k_1 = 0,9$.

Приведенные выше данные по влиянию добавок пластифика-

Таблица 10.7. Рекомендуемое количество пластифицирующих и пластифицирующе-воздухововлекающих добавок

Цемент	Добавки в расчете на сухое вещество, % массы цемента		
	СДБ, УПБ	М, ВЛХК	ГРП-1
Портландцемент, быстротвердеющий портландцемент	0,15...0,25	0,1...0,2	0,005...0,00
Сульфатостойкий портландцемент	0,1...0,2	0,05...0,15	0,01...0,02
Шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент	0,2...0,3	0,1...0,2	0,01...0,03

Таблица 10.8. Рекомендуемое количество воздухововлекающих и газообразующих добавок

Добавки	Количество добавки в расчете на сухое вещество, % массы цемента, при расходе его, кг/м ³		
	до 300	300...450	более 450
СНВ, СПД, ЦНИПС-1, СДО, С, ОП	0,005...0,015	0,01...0,02	0,015...0,035
ГКЖ-94	0,06...0,08	0,05...0,07	0,03...0,05

торов и суперпластификаторов на снижение водопотребности бетонной смеси относятся к тем случаям, когда в бетонную смесь вводится оптимальная дозировка добавки. При уменьшении содержания добавки эффективность ее воздействия на бетонную смесь уменьшается, при повышении содержания добавки по сравнению с оптимальными значениями заметно замедляется твердение бетонной смеси, что требует либо одновременного введения в бетонную смесь ускорителей твердения, либо применения других мероприятий, ускоряющих твердение бетона. В результате может снизиться технико-экономическая эффективность использования добавки в бетонной смеси.

Оптимальные дозировки пластифицирующих и воздухововлекающих добавок приведены в табл. 10.7 и 10.8. При дозировке пластифицирующих добавок учитывают вид цемента, а при выборе дозировки воздухововлекающих добавок — расход цемента.

Оптимальная дозировка суперпластификатора зависит от ожидаемого технико-экономического эффекта: вводится ли добавка для повышения подвижности бетонной смеси, либо сокращения расхода цемента, либо повышения прочности бетона, либо совершенствования формирования бетонных и железобетонных изделий. Эффект от применения добавки возрастает с увеличением ее со-

Таблица 10.9. Рекомендуемые составы комплексных добавок

Добавки	Количество добавок в расчете на сухое вещество. % массы цемента
СДБ+(СНВ, СПД)	(0,1 ... 0,3)+(0,003 ... 0,03)
СДБ+(ГКЖ-94, ПГЭН)	(0,1 ... 0,3)+(0,05 ... 0,1)
СДБ+(СН, ХК, НК, ННХК)	(0,1 ... 0,3)+(0,3 ... 1,5)
УПД+СН	(0,1 ... 0,3)+(0,5 ... 1,5)
ПАЩ-1+(СНВ, СПД)	(0,1 ... 0,3)+(0,005 ... 0,02)
СДБ+(СНВ, СПД)+ННК	(0,1 ... 0,15)+(0,001 ... 0,03)+ +(0,5 ... 1,5)

держания, но при содержании ее более 1,2% от массы цемента возможно замедление твердения бетона, что нежелательно при изготовлении сборных железобетонных конструкций. Определение оптимальной дозировки суперпластификаторов на практике производят опытным путем. Для расчета состава пробных замесов можно ориентировочно принимать, что для обычных бетонов оптимальная дозировка добавки составляет 0,5 ... 0,7%, а для высокопрочных бетонов — 0,7 ... 1,2% массы цемента.

При применении комплексных добавок учитывают суммарный эффект влияния добавки на бетонную смесь, а дозировки компонентов принимают для каждой добавки самостоятельно (табл. 10.9). Оптимальное решение по оптимальной дозировке добавки принимают после проведения контрольных испытаний. В этом случае стремятся достигнуть поставленных целей при минимально возможном расходе добавки.

Характер зависимости прочности бетона от цементно-водного отношения при применении химических добавок также не изменяется. Введение пластификатора и суперпластификатора может

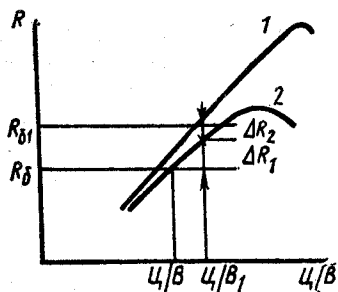


Рис. 10.12. Влияние суперпластификатора на зависимость прочности от Ц/В:
1 — бетон с суперпластификатором;
2 — бетон без добавки

несколько изменить положение кривой $R_6 = f(\text{Ц/В})$ по сравнению с кривой для бетона без добавки. Если добавка приводит к дополнительному воздухововлечению в бетонную смесь, то прочность при одном и том же Ц/В несколько понижается. Если же добавка способствует получению более плотного цементного камня, то прочность несколько повышается, а соответственно кривая $R_6 = f(\text{Ц/В})$ располагается выше кривой для обычного бетона (рис. 10.12). Положение кривой или значение коэффициентов в формулах прочности бетона может быть установлено в результате пред-

варительных испытаний. При определении состава бетона можно использовать вышеприведенные формулы (10.10), (10.11), а возможные изменения прочности бетона учитывать поправочным коэффициентом $k_2 = R_{\text{доб}}/R_6$. Если добавка не влияет на прочность бетона в возрасте 28 сут, то коэффициент $k_2 = 1$.

Введение пластификаторов и суперпластификаторов расширяет область, в которой наблюдается прямолинейная зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения. Для бетона с пластификаторами изменение прямолинейной зависимости наступает при $\text{Ц/В} > 3,3$, а для бетонов с суперпластификаторами — при $\text{В/Ц} > 4$ (рис. 10.12). Это влияние добавок на свойства бетона при высоких значениях Ц/В позволяет использовать при расчете высокопрочных бетонов формулу $R_6 = AR_{\text{ц}}/(\text{Ц/В} - C)$, т. е. производить расчет обычного и высокопрочного бетона по единой формуле прочности.

Если расход цемента при приготовлении бетона остается неизменным, то суммарное влияние добавок пластификатора и суперпластификатора на свойства бетона складывается из влияния их на плотности цементного камня и тем самым на повышение прочности бетона (при постоянном В/Ц), что учитывается коэффициентом k_2 , и из эффекта, достигаемого за счет снижения расхода воды и повышения вследствие этого Ц/В. На рис. 10.12 подобно изменению прочности иллюстрируют отрезки ΔR_1 и ΔR_2 .

Можно оценить суммарное влияние добавок с помощью суммарного коэффициента k_3 , который представляет собой отношение прочности бетона с добавкой и пониженным В/Ц (для равноподвижной бетонной смеси) $R_{\text{доб}}$ к прочности бетона без добавки R_6 .

Так как $R_{\text{доб}} = k_2 AR_{\text{ц}} [\text{Ц}/(k_1 \text{В}) - 0,5]$, то

$$k_3 = k_2 \frac{1 - k_2 0,5 k_1 \text{В}/\text{Ц}}{1 - 0,5 k_1 \text{В}/\text{Ц}} \quad (10.18)$$

При введении в бетонную смесь воздухововлекающих добавок расчет расхода материалов для пробных замесов следует вести с учетом содержания в бетоне 4 ... 5% - вовлеченного воздуха (т. е. 40 ... 50 л/м³). Поэтому уравнения, обуславливающие получение плотной структуры бетона (см. § 10.1), примут вид

$$\text{Ц}/\rho_{\text{ц}} + \text{В} + \text{П}/\rho_{\text{п}} + \text{Щ}/\rho_{\text{щ}} + \text{ВВ} = 1000 \quad (10.19)$$

и

$$\text{Ц}/\rho_{\text{ц}} + \text{В} + \text{П}/\rho_{\text{п}} + \text{В} = \text{П}_{\text{ц}} \alpha \text{Щ}/\rho'_{\text{щ}}, \quad (10.20)$$

где ВВ — содержание вовлеченного воздуха, л.
Расход песка следует определять по формуле

$$\text{П} = [1000 - (\text{Ц}/\rho_{\text{ц}} + \text{В} + \text{Щ}/\rho_{\text{щ}} + \text{ВВ})] \rho_{\text{п}}. \quad (10.21)$$

Как показали опыты, для улучшения удобоукладываемости бетонной смеси, водонепроницаемости и морозостойкости бетона значение коэффициента a следует увеличивать на 0,05 ... 0,1 против значений, рекомендованных в табл. 10.4.

Для получения бетонных смесей одинаковой жесткости или подвижности при введении воздухововлекающих добавок расход воды, определенный по рис. 3.32, можно уменьшить на 15 ... 20 л. Следует иметь в виду, что воздухововлекающие добавки в большей степени улучшают удобоукладываемость бетонной смеси и в меньшей — ее подвижность. При определении состава бетона с воздухововлекающей добавкой можно принимать в расчет пониженные значения осадки конуса в соответствии с рекомендациями § 11.4.

Приведенные соображения для добавок пластификаторов и суперпластификаторов можно распространить и на случай применения добавок — ускорителей твердения. Эти добавки, заметно изменяя твердение бетона в раннем возрасте, практически мало влияют на его прочность в возрасте 28 сут. В отдельных случаях повышение прочности составляет не более 10 ... 15 %, поэтому можно полагать, что добавки — ускорители твердения не меняют зависимости прочности бетона от цементно-водного фактора в возрасте 28 сут, а возможное влияние их на изменение прочности можно учитывать, как в случае с пластификаторами, коэффициентом k_2 .

Добавки-ускорители твердения существенно изменяют прочность бетона в раннем возрасте, однако влияние их на кинетику твердения бетона зависит от вида цемента, состава бетона, условий твердения и ряда других факторов. Возможное повышение прочности бетона вследствие применения добавок в возрасте 1 сут приведено далее в табл. 11.3. Наилучшие результаты достигаются, когда твердение бетона с добавками происходит при несколько повышенной температуре. Это позволяет в раннем возрасте получить достаточно высокую относительную прочность бетона и в некоторых случаях отказаться от тепловой обработки железобетонных изделий.

Добавки-ускорители твердения должны вводиться в бетонную смесь в оптимальных количествах. Это устанавливается из условия, что добавка оказывает еще достаточно эффективное воздействие на бетон, но при этом не вызывает побочных отрицательных явлений. При меньшей дозировке добавки падает ее эффективность, при большей, с одной стороны, значительно понижается эффект от воздействия каждого дополнительного количества добавки, вводимого в бетон сверх оптимального, что снижает общий технико-экономический эффект, а с другой стороны, могут наступить нежелательные явления, например в повышенных количествах добавка $CaCl_2$ может способствовать коррозии арматуры. Оптимальные дозировки добавок обычно устанавливают

Таблица 10.10. Оптимальное содержание добавок-ускорителей твердения и ингибиторов коррозии стали

Цемент	В/Ц	Содержание добавок в расчете на сухое вещество, % от массы цемента		
		СХ, ХК	НК, ННХК	ННК, НН
Портландцемент, БТЦ, сульфатостойкий портландцемент	0,35...0,55	1...1,5	1,5...2,5	2,5
	0,55...0,75	0,5...1	1...2	2
Шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент, пластифицированный или гидроробный портландцемент	0,35...0,55	1,5...2	2...3	3
	0,55...0,75	1...1,5	1,5...2,5	2,5

опытным путем. Для определения состава бетона для пробных замесов можно принимать оптимальные дозировки добавок по табл. 10.10.

Используя коэффициенты эффективности добавок в бетонной смеси и бетона k_1 и k_2 , можно существенно упростить определение состава бетона. В этом случае используют методику для обычных бетонов, вводя в расчетные формулы соответствующий поправочный коэффициент.

■ Определение состава производят в такой последовательности:

1. По известным таблицам или графикам для обычного бетона определяют расход воды в зависимости от требуемой подвижности бетонной смеси и затем устанавливают расход воды V_1 для бетона с добавкой:

$$V_1 = k_1 V, \quad (10.22)$$

где k_1 принимают в соответствии с вышеприведенными рекомендациями.

2. Определяют значение В/Ц:

$$В/Ц = \frac{k_2 AR_{II}}{R_6 + 0,5k_2 AR_{II}}, \quad (10.23)$$

где k_2 получают на основе предварительных опытов либо принимают равным 1.

3. Определяют расход цемента:

$$Ц = V_1 : В/Ц. \quad (10.24)$$

4. Определяют по известным формулам расходы щебня и песка. При этом коэффициент раздвижки при применении пластифицирующих-воздухововлекающих добавок можно принимать на 0,1 ... 0,2 больше, чем для обычного бетона. Это обеспечивает лучшую однородность и связность материала.

Полученный состав бетона проверяют в пробных замесах.

При необходимости установить оптимальную дозировку добавки целесообразно произвести испытания бетонов девяти составов при определенном расходе цемента, обеспечивающем за-

данную прочность бетона, варьируя дозировки добавок и расход воды, т. е. подвижность бетонной смеси. Например, принимая расход цемента 300 кг/м³ и подвижность бетонной смеси 1...2, 6...8, 12...14 см, изготавливают и испытывают бетоны при дозировке добавки 0,5; 0,75 и 1%. Подбор состава бетона для пробных замесов можно производить по рассмотренной ранее методике. При определении оптимальной дозировки компонентов комплексных добавок целесообразно использовать методы математического моделирования.

Сравнение между собой эффективности действия различных добавок целесообразно делать при определенных усредненных параметрах, например при расходе цемента 300 кг/м³, оптимальной дозировке добавки (для суперпластификатора можно применять среднюю дозировку 0,75%) и подвижности бетонной смеси 2...3 см. Изменение эффекта воздействия при изменении состава бетона можно учитывать в соответствии с известными особенностями влияния той или иной добавки на свойства бетонной смеси или бетона. Полученные в результате испытания бетона среднего состава данные о коэффициентах k_1 и k_2 можно использовать для определения состава бетона в пробных замесах.

Пример 10.3. Определить состав высокопрочного бетона с прочностью 80 МПа при применении цемента марки 500. Подвижность бетонной смеси 2 см, суперпластификатор 10-03, оптимальная дозировка суперпластификатора 0,75% от массы цемента. Щебень гранитный с истинной плотностью 2,6 кг/дм³ и плотностью 1,48 кг/дм³. Песок строительный средней крупности с истинной плотностью 2,62 кг/дм³.

Коэффициент раздвижки зерен α в этом случае может быть принят 1,25.

1. Определяют по рис. 3.32 расход воды, обеспечивающий требуемую подвижность бетонной смеси 2: $V=170$ кг/м³ (корректировку на расход цемента не производят). Тогда расход воды в бетонной смеси с добавкой $V_1=0,8 \times \times 170=136$ кг/м³.

2. Определяют водоцементное отношение:

$$V/C = \frac{1 \cdot 0,65 \cdot 500}{10,80 + 0,5 \cdot 1 \cdot 0,65 \cdot 500} = 0,29.$$

3. Определяют расход цемента: $C=136 : 0,29=469$ кг/м³.

4. Определяют расход добавки: $D=0,75 \cdot 469=3,52$ кг.

5. Определяют расход щебня:

$$\Pi = \frac{1000}{0,38 \cdot 1,25 / 1,48 + 1/2,6} = 1418 \text{ кг/м}^3.$$

6. Определяют расход песка: $\Pi = [1000 - (151 + 136 + 545)] / 2,62 = 440$ кг/м³.

При приготовлении бетонной смеси добавки вводят в бетоносмеситель вместе с водой затворения. Предварительно приготавливают водные растворы добавок повышенной концентрации: 1...5% для воздухововлекающих добавок и ВРП-1, 5...10% для пластифицирующих воздухововлекающих и воздухововлекающих добавок; 10...20% концентрации для суперпла-

Таблица 10.11. Плотность раствора различных добавок в зависимости от его концентрации

Концентрация раствора, %	Плотность раствора, г/см ³							
	СДБ	10-03	С-3	СН	ХК	ННХК	СНВ	ГКЖ-10
2	1,009	1,007	1,008	1,016	1,015	1,018	1,005	1,012
4	1,014	1,016	1,035	1,032	1,035	1,012	1,012	1,025
6	1,025	1,021	1,024	1,054	1,049	1,052	1,018	1,038
8	1,033	1,028	1,032	1,072	1,066	1,07	1,024	1,05
10	1,043	1,035	1,04	1,092	1,084	1,087	1,03	1,63
15	1,068	1,057	1,065	1,141	1,13	1,131	1,045	—
20	1,091	1,08	1,09	—	1,178	1,175	1,06	—
30	1,144	1,14	1,145	—	1,280	1,263	1,089	—
40	1,202	—	—	—	—	—	1,12	—

стификаторов. Водные растворы добавок повышенной концентрации подают в дозатор воды, в котором их разбавляют до рабочей концентрации. Дозирование растворов повышенной концентрации обычно производят через жидкостный дозатор добавок.

Концентрация раствора определяет его плотность. По плотности контролируют концентрацию раствора при его приготвлении. Эти характеристики используют при определении расхода раствора, вводимого в бетонную смесь. Зависимость плотности раствора от его концентрации для наиболее употребительных добавок представлена в табл. 10.11.

Расход раствора добавки повышенной концентрации A (л) на 1 м³ бетона определяют по формуле

$$A = C D / (k \rho_p), \quad (10.25)$$

где C — расход цемента, кг/м³; D — дозировка добавки, % массы цемента; k — концентрации приготовленного раствора, %; ρ_p — плотность приготовленного раствора, г/см³.

Недостающее для затворения 1 м³ бетонной смеси количество воды V_2 (л) определяют по формуле

$$V_2 = V_1 - A \rho_p (1 - k/100), \quad (10.26)$$

где V_1 — расход воды на 1 м³ бетона.

Раствор добавок из твердых или пастообразных продуктов готовят растворением их в заданном количестве воды. После полного растворения продукта ареометром проверяют плотность полученного продукта и доводят до заданной добавлением продукта или воды. Для повышения скорости растворения добавок рекомендуется подогревать воду до 40...70°C и перемешивать растворы при приготовлении.

При применении комплексных добавок, как правило, используют отдельные установки для приготовления и дозирования

водных растворов каждого компонента. Смешивание компонентов комплексной добавки производят непосредственно в дозаторе воды перед поступлением в бетономеситель. В отдельных случаях комплексные добавки готовят заблаговременно путем совмещения в одном растворе разных компонентов. При приготовлении комплексных добавок необходимо учитывать совместимость компонентов и жизнеспособность получаемой добавки, так как в некоторых случаях может наблюдаться взаимодействие между компонентами, которое окажет влияние на свойства готового продукта.

Контроль количества добавки ведут по плотности ее водного раствора. При изменении температуры вводят соответствующую поправку в показатель плотности:

$$\rho_t = \rho_{20} - A(t - 20), \quad (10.27)$$

где ρ_t , ρ_{20} — плотность раствора при данной температуре и при 20 °С; A — температурный коэффициент плотности; t — температура раствора в момент определения его плотности, °С.

При объемном дозировании растворов добавок учитывают влияние температуры по формуле

$$D_t = D_{20} \rho_t / \rho_{20}, \quad (10.28)$$

где D_t и D_{20} — содержание добавки в 1 л раствора соответственно при температуре t и 20 °С (содержание добавки можно определить по ее концентрации $D_{20} = k \rho_{20}$), кг.

ГЛАВА 11

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА РАЗНЫХ ВИДОВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

§ 11.1. БЕТОН ДЛЯ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций применяют тепловую обработку. Рост прочности при этом определяется не только активностью цемента, составом бетона, консистенцией бетонной смеси, но также режимом тепловой обработки и другими факторами. В этих условиях наиболее точные результаты можно получить при определении состава бетона на основе предварительных испытаний.

Значение Ц/В для пробных замесов выбирают по табл. 11.1. Указанные пределы Ц/В обеспечивают получение требуемой отпускной прочности бетона при обычно применяющихся на заводах сборного железобетона режимах тепловой обработки: предварительная выдержка — 1 ... 2 ч, подъем температуры — 2 ...

Таблица 11.1. Значения цементно-водных отношений для пробных замесов

Требуемая прочность бетона R_{28} , МПа	Марка цемента			
	300	400	500	600
<i>Отпускная прочность бетона 70% R_{28}</i>				
10	1...1,5	1,1...1,5	—	—
15	1,2...1,5	1,1...1,5	—	—
20	1,5...2	1,2...2	1,2...1,5	—
25	1,5...2,2	1,2...2	1,2...1,8	—
30	2...2,5	1,8...2,2	1,5...2	1,2...1,8
40	—	2...2,8	2...2,4	1,5...2,2
50	—	—	2,2...2,8	1,8...2,8
<i>Отпускная прочность бетона 85% R_{28}</i>				
10	1,1...2,5	—	—	—
15	1,4...1,8	1,2...1,8	1,2...1,6	—
20	1,8...2,2	1,5...2,0	1,4...1,8	—
30	—	2,0...2,5	1,8...1,2	1,4...2,0
40	—	2,2...2,5	2,2...2,5	1,8...2,2
50	—	—	2,4...2,8	2,2...2,6

... 3, изотермическая выдержка — 6 ... 12, остывание — 3 ... 4 ч. Температура изотермической выдержки для бетона на портландцементе 80 °С, для бетона на шлакопортландцементе 90 °С. Определение состава бетона для пробных замесов производят обычным способом (см. гл. 10).

Если продолжительность режима тепловой обработки задана технологическим регламентом, то по результатам опытов находят зависимости $R_{отп} = f(\text{Ц/В})$ и $R_{28} = f(\text{Ц/В})$ при заданном режиме и по ним определяют требуемое Ц/В и окончательный состав бетона. Более оптимальные результаты получают, если выбор состава бетона увязывают с назначением режима тепловой обработки.

В этом случае для проведения предварительных испытаний применяют три значения Ц/В, выбранных в указанных пределах (табл. 11.1) и при режимах тепловой обработки продолжительностью t_i (например, при изотермической выдержке 6, 9, 12 ч). По результатам опытов устанавливают зависимости $R_{отп} = f(\text{Ц/В}, t_i)$ и $R_{28} = f(\text{Ц/В}, t_i)$, по которым определяют оптимальный состав бетона и требуемый режим тепловой обработки.

Пример 11.1. Определить состав бетона с заданной средней прочностью 30 МПа, обеспечивающий получение после 8 ч пропаривания 70% R_{28} . Бетонная смесь должна иметь жесткость 15 с. Материалы те же, что и в примере 10.1.

Определяют состав бетонов для двух пробных замесов со значениями Ц/В, в пределах которых можно получить 70% проектной прочности бетона при пропаривании в течение 8 ч.

1. Для пробных замесов по табл. 11.1 принимают Ц/В=1,8 и 2,2.
2. Расход воды по графику на рис. 3.32 равен $V = 130 + 10 = 140$ л.

$R_B, \text{МПа}$

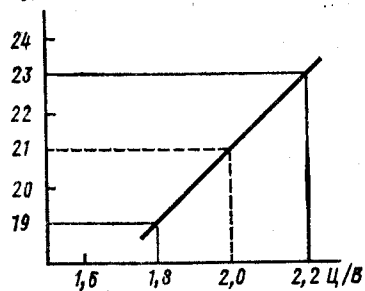


Рис. 11.1. Построение кривой для выбора Ц/В в зависимости от заданной прочности бетона

По результатам испытания пропаренного бетона

3. Расход цемента (с округлением до 5 кг) $\text{Ц}_1=1,8 \cdot 140=250$ кг; $\text{Ц}_2=2,2 \cdot 140=310$ кг.

4. Коэффициент раздвижки (для жесткой смеси) $\alpha=1,1$.

5. Расход щебня для обоих пробных замесов

$$\text{Щ} = \frac{1000}{0,43 \cdot 1,1/1,48 + 1/2,6} = 1415 \text{ кг.}$$

6. Расход песка

$$\text{П}_1 = [1000 - (250/3,1 + 140 + 1415/2,6)] 2,63 = 640 \text{ кг;}$$

$$\text{П}_2 = [1000 - (310/3,1 + 140 + 1415/2,6)] 2,63 = 565 \text{ кг.}$$

7. Получают первый пробный замес: $\text{Ц}_1=250$; $\text{В}_1=140$ л; $\text{П}_1=640$ кг; $\text{Щ}_1=1415$ кг; второй пробный замес: $\text{Ц}_2=310$ кг; $\text{В}_2=140$ л; $\text{П}_2=565$ кг; $\text{Щ}_2=1415$ кг.

Готовят по девять кубов размером $15 \times 15 \times 15$ см, шесть из них пропаривают в течение 8 ч. Через 4 ч после пропаривания испытывают три куба при сжатии. Пусть при этом окажется, что для бетона с Ц/В=1,8 $R_1=1,9$ МПа, а для бетона с Ц/В=2,2 $R_2=2,3$ МПа.

Строят график $R_B=f(\text{Ц/В})$ (рис. 11.1).

По заданию требуется, чтобы после пропаривания предел прочности при сжатии составлял 70% $R_{2в}$, т. е. $0,7 \times 30 \cdot 0,1 = 21$ МПа. По графику такая прочность может быть достигнута при Ц/В=2.

Окончательный состав бетона: $\text{В}=140$ л; $\text{Ц}=2 \cdot 140=280$ кг; $\text{Щ}=1415$ кг; $\text{П}=[1000 - (280/3,1 + 140 + 1415/2,6)] 2,63 = 590$ кг.

Если контрольные испытания в возрасте 28 сут оставшихся трех пропаренных кубов и трех кубов, твердевших в нормальных условиях, покажут (при построении аналогичных графиков), что при Ц/В=2 достигается заданная средняя прочность бетона с точностью $\pm 15\%$ как при нормальном хранении образцов, так и после пропаривания, то корректировать состав не надо. Если прочность пропаренных образцов в 28-суточном возрасте окажется ниже заданной, то соответственно увеличивают Ц/В.

§11.2. ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН

● В современных условиях возможно получать высокопрочные бетоны с прочностью 50 ... 100 МПа и особо высокопрочные с прочностью более 100 МПа. На практике более широкое применение получили высокопрочные бетоны с прочностью 50 ... 80 МПа. Для получения высокой прочности необходимо создать особоплотную, прочную и монолитную структуру бетона. Этого можно достигнуть при выполнении ряда условий, вытекающих из физических основ структурообразования бетона: 1) применением высокопрочных цементов и заполнителей; 2) предельно низким водоцементным отношением; 3) высоким предельно допустимым расходом цемента; 4) применением суперпласти-

фикаторов и комплексных добавок, способствующих получению плотной структуры бетона; 5) особо тщательным перемешиванием и уплотнением бетонной смеси; 6) созданием наиболее благоприятных условий твердения бетона.

Для высокопрочных бетонов следует принять цементы активностью $R_{ц} > 50$ МПа желательнее с низкими значениями нормальной густоты. В зависимости от назначения бетона для его приготовления целесообразно использовать цемент определенного минералогического состава. При изготовлении сборных железобетонных изделий небольших и средних размеров применяют высокопрочные тонкомолотые портландцементы с повышенным содержанием C_3S и C_3A и быстротвердеющие цементы. Для массивных изделий и конструкций, изготавливаемых на полигонах без тепловой обработки, рекомендуется применять цементы с пониженным содержанием C_3A и ограниченным содержанием C_3S (менее 50%), лучше всего белитовые. Такие цементы твердеют в течение длительного срока, обеспечивая высокую конечную прочность бетона. В первые сутки твердения тепловыделение и усадка цемента небольшие и соответственно объемные деформации и вредные собственные напряжения и в бетоне также невелики. Для обеспечения более равномерного твердения могут также использоваться пластификаторы и замедлители твердения.

Заполнители для высокопрочного бетона должны быть чистыми и обладать хорошим зерновым составом и малой пустотностью, не содержать по возможности слабых зерен. Предел прочности крупного заполнителя должен быть на 20% выше заданной прочности бетона. С повышением прочности бетона влияние заполнителя на структуру бетона и результаты испытаний постепенно увеличиваются. Для каждого заполнителя имеется предельное значение прочности бетона, выше которого на данном заполнителе получить бетон трудно и экономически невыгодно, так как незначительное повышение прочности бетона сопровождается значительным увеличением расхода цемента. Обычно этот предел наступает, когда прочность на растяжение бетона приближается к прочности заполнителя. Для особо высокопрочных бетонов применяют заполнители повышенной прочности из диабазы и базальта.

Высокая плотность и прочность бетона достигаются применением предельно низкого водоцементного отношения. Однако с уменьшением В/Ц повышается вязкость цементного теста, ухудшаются условия приготовления и уплотнения бетонной смеси, увеличивается воздухоовлечение. В результате нарушается прямолинейная зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения и после достижения определенных значений В/Ц дальнейшее его снижение практически мало способствует повышению прочности бетона. В обычных условиях это наблюдается при $\text{В/Ц} < 0,4$.

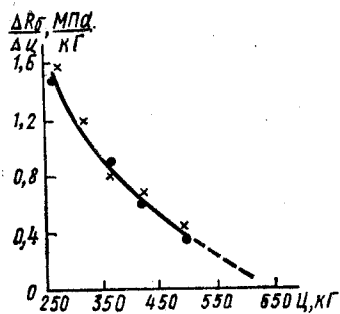


Рис. 11.2. Влияние увеличения расхода цемента Ц на прирост прочности бетона $\Delta R_0/\Delta Ц$

Для получения высокопрочных бетонов необходимо применять более низкие В/Ц, что требует использования специальных приемов, позволяющих плотно укладывать бетонные смеси в этом случае. К таким приемам относится применение суперпластификаторов или комплексных добавок, содержащих повышенную дозу пластификатора, ускорителя твердения и антивоздуховлекающий компонент, либо использование особо интенсивных способов уплотнения бетонной смеси, например прессования или роликового проката. В результате достигается высокая плотность и прочность бетона.

При применении суперпластификаторов прямолинейная зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения сохраняется до Ц/В=4 и определять В/Ц высокопрочного бетона можно по формуле (10.10).

Существенное значение для технологии высокопрочного бетона имеет тот факт, что при низких В/Ц нарушается закон постоянства водопотребности бетонной смеси, т. е. при увеличении расхода цемента свыше 400 кг/м³ приходится для получения равноподвижных смесей увеличивать одновременно и расход воды, чтобы компенсировать резкое повышение вязкости цементного теста. Соответственно возрастает расход цемента, что приводит к ухудшению структуры бетона, увеличению тепловыделения и усадки, к росту вредных внутренних напряжений и деструктивных явлений. В результате снижается эффективность использования цемента (рис. 11.2). Дальнейшее увеличение расхода цемента сверх 550 ... 600 кг/м³ практически мало повышает прочность бетона и экономически нецелесообразно.

Для гарантированного получения плотной и прочной структуры расход цемента в высокопрочном бетоне ограничивают: для сборных железобетонных изделий малых и средних размеров максимально допустимый расход цемента 550 кг/м³, для изделий большой массивности — 450 кг/м³. В высокопрочных бетонах следует особо уделять внимание снижению расхода цемента, так как при прочих равных условиях это способствует получению более плотной и менее дефектной структуры бетона и повышению его прочности. Для снижения расхода цемента используют: 1) применение более высокопрочных цементов, повышение их активности механическим или химическим путем (домол с добавкой 2 ... 3 % гипса или с комплексной добавкой на основе суперпластификаторов по удельной поверхности 4000 ... 5000 см², активацию в специальных установках, введение крентов); 2) при-

менение специально подобранной смеси заполнителей с минимальной пустотностью и водопотребностью; 3) введение в бетонную смесь суперпластификаторов и комплексных добавок; 4) назначение класса бетона, если это возможно, по его прочности в большем возрасте, чем 28 сут.

Введение суперпластификаторов особенно эффективно снижает расходы цемента, так как этому способствуют не только резкое повышение подвижности и улучшение уплотняемости бетонной смеси, но и тот факт, что в этом случае постоянство водопотребности сохраняется при высоких расходах цемента (до 550 кг/м³), т. е. в этом случае не требуется дополнительного расхода цемента для компенсации повышенной вязкости бетонной смеси. В результате повышается эффективность использования цемента в высокопрочных бетонах.

Наилучшими условиями для твердения высокопрочного бетона являются нормальные (температура 20 ... 25 °С, влажность 100 %). С повышением температуры и особенно при тепловой обработке в твердеющем бетоне возникают градиенты температуры и влажности, приводящие к миграции влаги, к температурно-влажностным деформациям и неравномерной усадке цементного камня. В результате увеличиваются деструктивные явления, поэтому при применении для ускорения твердения высокопрочного бетона тепловой обработки необходимо применять более длительную предварительную выдержку, очень мягкие режимы с постепенным подъемом и спуском температуры, снижать температуру прогрева до 50 ... 60 °С, обеспечивать высокую влажность среды. Не следует назначать слишком длительных режимов прогрева, ограничивая его продолжительность моментом, когда прочность бетона достигнет 50 ... 70 % его класса. В этом случае высокопрочные бетоны удовлетворительно твердеют в дальнейшем. Оптимальные режимы прогрева назначают по результатам предварительных опытов.

При соблюдении рассмотренных условий прочность бетона может превысить марку цемента в 1,5 ... 1,7 раза. Применение высокопрочного бетона позволяет сократить массу и материалоемкость железобетонных изделий. Пример подбора состава высокопрочного бетона приведен в § 10.7.

§ 11.3. БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЙ БЕТОН

● Получение быстротвердеющего бетона, обладающего относительно высокой прочностью в раннем возрасте (1 ... 3 сут) при твердении в нормальных условиях, достигается применением быстротвердеющего цемента, а также различными способами ускорения твердения цемента. К этим способам относятся: 1) применение жесткой бетонной смеси с низкими значениями водоцемент-

ного отношения; 2) использование добавок — ускорителей твердения (CaCl_2), глиноземистого цемента и др.; 3) сухое или мокрое домалывание цемента с добавкой гипса (2 ... 5% от массы цемента) или с применением комплексных специальных добавок; 4) активация цементного раствора.

Наилучшие результаты получаются при проведении комплекса мероприятий. При применении алюминатного цемента М400, домолотого с 3% гипса, жесткой бетонной смеси с $V/C=0,35$, добавки хлористого кальция в количестве 2% от массы цемента и виброперемешивания автором были получены бетоны с прочностью при сжатии в первые сутки 30 ... 50 МПа.

При определении состава быстротвердеющего бетона водоцементное отношение устанавливается по заданной прочности бетона в раннем возрасте с учетом выбранного способа ускорения твердения. Дальнейший расчет состава бетона производят по методике, рассмотренной в гл. 10. Окончательный состав устанавливают по результатам предварительных опытов, которые проводят с применением материалов и способов ускорения твердения, назначенных к использованию в производстве.

При выборе состава бетона для первых пробных замесов можно пользоваться формулой, устанавливающей прочность бетона через 1 сут при твердении в нормальных условиях:

$$R_{61}=0,65R_{ц1}(C/B-1,30), \quad (11.1)$$

где $R_{ц1}$ — прочность цемента при сжатии через 1 сут, МПа.

Можно также пользоваться данными табл. 11.2, где показана зависимость между прочностью бетона в раннем возрасте и различными способами ускорения твердения бетона.

Таблица 11.2. Влияние различных способов ускорения твердения на прочность бетона в раннем возрасте

Способ ускорения твердения	Повышение предела прочности бетона при сжатии по сравнению с обычным бетоном на цементах М400...500, % в возрасте	
	1 сут	2 сут
Применение БТЦ или цемента М600	130...170	115...135
Добавка 2% CaCl_2 от массы цемента	150...200	125...150
Дополнительный помол цемента с добавкой 2 ... 3% гипса до удельной поверхности 5000 ... 6000 $\text{см}^2/\text{г}$	200...250	150...200
Активация бетонной смеси или цемента, виброперемешивание	140...170	120...300
Дополнительный помол цемента, добавка 2% CaCl_2 и активация бетонной смеси (совместное действие)	300...400	200...300

Таблица 11.3. Влияние марки цемента и добавки CaCl_2 на прочность бетона в раннем возрасте

Режим твердения	Прочность в долях от R_{28} при использовании портландцемента марки					
	400		БТЦ		500	
	без добавки	с добавкой	без добавки	с добавкой	без добавки	с добавкой
1 сут нормального твердения при 20 ... 25°C	0,2	0,35	0,3	0,4	0,3	0,4
3 сут нормального твердения при 20 ... 25°C	0,4	0,55	0,5	0,6	0,5	0,6

Примечание. Приведенные средние значения получены для бетонов из жестких бетонных смесей при $V/C=0,4$.

Для расчета состава бетона используют и другие данные, например из табл. 11.3, в которой приведены ориентировочные значения прочности бетона (в долях от R_{28}) в зависимости от его состава и условий твердения. Экспериментальная проверка и корректировка по ее результатам состава быстротвердеющего бетона обязательны, так как, во-первых, увеличение прочности бетона в раннем возрасте в результате применения того или иного способа ускорения твердения в значительной степени зависит от вида цемента, состава бетона и других факторов и поэтому приведенные в табл. 11.2 и 11.3 цифры являются только ориентировочными, и, во-вторых, увеличение прочности бетона при применении нескольких способов не является прямой суммой значений прироста прочности бетона, достигаемого каждым способом в отдельности.

Пример 11.2. Определить V/C , необходимое для получения бетона прочностью при сжатии через 1 сут $R_{61}=10$ МПа, если прочность цемента при сжатии через 1 сут $R_{ц1}=13$ МПа.

По формуле (11.1),

$$V/C=0,65 \cdot 13 / (10 + 0,65 \cdot 1,29 \cdot 13) = 0,4.$$

Пример 11.3. Определить способ ускорения твердения, необходимый для получения $R_{61}=20$ МПа при применении цемента с прочностью $R_{ц1}=13$ МПа и гранитного щебня с предельной крупностью 20 мм. Удобоукладываемость бетонной смеси 7 ... 8 с, арматура диаметром менее 4 мм.

По графику на рис. 3.32 расход воды 160 л/м³. Предельный расход цемента с учетом возможного его домолота 450 кг/м³. Следовательно, наименьшее возможное $V/C=160/450=0,35$. Из формулы (11.1) $R_{61}=0,65 \cdot 13(1/0,35-1,30)=13$ МПа, т. е. путем применения специальных технологических приемов необходимо увеличить прочность бетона на $(20/13) \cdot 100=153\%$. Использовать хлористый кальций нельзя, так как в конструкции предполагается применение арматуры малого диаметра, поэтому выбирают активацию цемента (см. табл. 11.2).

Допустим, что контрольные испытания покажут повышение прочности бетона в возрасте 1 сут при применении данных материалов и активации на

170%. Тогда окончательно принимают $V/C=0,65 \cdot 13 / (20/1,7 + 0,65 \cdot 1,29 \cdot 13) = 0,37$, расход цемента $C=160/0,37=429$ кг.

Пример 11.4. Определить V/C , требуемое для получения через 3 сут прочностного бетона на сжатие 30 МПа при применении портландцемента М500 и жесткой бетонной смеси. Твердение бетона нормальное при 20...25 °С.

По табл. 11.3, $R_{628}=R_{63}/0,5=300 \cdot 0,1/0,5=60$ МПа.

По формуле (10.10), $V/C=0,6 \cdot 500 / (600 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 500) = 0,4$.

Из добавок-ускорителей твердения наиболее распространен хлористый кальций, обеспечивающий наилучшие результаты по сравнению с другими добавками. Хлористый кальций позволяет ускорить твердение бетона в раннем возрасте, несколько снизить расход цемента и улучшить удобоукладываемость смеси. Наиболее целесообразно вводить хлористый кальций в состав бетонов, приготовляемых на пуццолановых цементах, шлакопортландцементах или медленно твердеющих портландцементах. В бетонных конструкциях количество такой добавки не должно превышать 3%, а в железобетонных — 2% от массы цемента. Если диаметр арматуры менее 4 мм и конструкция предназначена для длительной эксплуатации, то в бетон нельзя вводить хлористый кальций, так как он способствует развитию коррозии арматуры. Оптимальное содержание хлористого кальция 1...2%. Устанавливают его опытным путем, так как эффективность добавки зависит от многих факторов (минералогического состава и тонкости помола цемента, условий выдерживания и др.), которые невозможно учесть при расчете. Для равномерного распределения хлористого кальция в бетонной смеси его вводят в виде раствора вместе с водой затворения. Твердый или жидкий хлористый кальций растворяют в воде до концентрации, соответствующей плотности раствора, — около 1,2 г/см³.

Определение состава бетона с добавкой хлористого кальция производят обычным способом (см. гл. 10). Оптимальное содержание добавки устанавливают путем сравнения в пробных замесах бетона без добавки и с добавкой в количестве 1 и 2% (иногда 1; 1,5 и 2%). Расход раствора хлористого кальция определяют по табл. 11.4 и учитывают при окончательном установлении рас-

Таблица 11.4. Определение расхода раствора CaCl₂

Плотность раствора	Содержание CaCl ₂ в растворе, кг/л	Расход раствора на 100 кг цемента, л, при введении CaCl ₂ , % от массы цемента			Плотность раствора	Содержание CaCl ₂ в растворе, кг/л	Расход раствора на 100 кг цемента, л, при введении CaCl ₂ , % от массы цемента		
		1	1,5	2			1	1,5	2
1,15	0,204	4,89	7,35	9,70	1,21	0,2885	3,47	5,2	6,94
1,16	0,2179	4,59	6,88	9,18	1,22	0,3032	3,3	4,95	6,6
1,17	0,2316	4,32	6,47	8,64	1,23	0,3181	3,15	4,73	6,3
1,18	0,2454	4,07	6,1	8,15	1,24	0,3334	3	4,5	6
1,19	0,2569	3,9	5,85	7,8	1,25	0,3488	2,87	3,3	5,74
1,2	0,2739	3,66	5,48	7,32					

Таблица 11.5. Определение расхода раствора нитрит-нитрата кальция (ННК) и нитрит-нитрат-хлорида кальция (ННХК)

Плотность раствора, г/см	Содержание добавки в растворе, кг/л	Расход раствора на 100 кг цемента, л, при введении добавки, % от массы цемента		
		1	2	3
ННК:				
1,085	0,108	9,26	18,52	27,78
1,128	0,170	5,88	11,76	17,64
1,171	0,235	4,25	8,50	12,75
1,212	0,302	3,31	6,62	9,93
1,255	0,364	2,75	5,50	8,25
ННХК:				
1,087	0,108	9,26	18,52	27,28
1,131	0,170	5,88	11,76	17,64
1,175	0,235	4,25	8,50	12,76
1,218	0,305	3,28	6,56	0,84
1,263	0,379	2,64	5,28	7,92

хода воды (соответственно уменьшая его, чтобы сохранить принятое V/C).

Пример 11.5. Определить оптимальный расход добавки CaCl₂ обеспечивающий достижение наибольшей прочности бетона М300 в возрасте 1 сут. Подвижность бетонной смеси и материалы те же, что и в примере 10.1.

Расход материалов для бетона без добавки определяют так же, как в примере 10.1.

Расход раствора с плотностью 1,2 г/см³ для бетона с добавкой 1 и 2% CaCl₂ устанавливают по табл. 11.4: при 1% CaCl₂ требуется раствора 300 × 0,01=11 л; при 2% CaCl₂ требуется раствора 300 · 0,01 · 7,32=22 л. Расход воды соответственно уменьшается до 167 и 154 л, расходы цемента и заполнителей не изменяются.

Допустим, что контрольные кубы в возрасте 1 сут покажут следующую прочность: бетон без добавки—7 МПа; с добавкой 1% CaCl₂—8,7 МПа; с 2% CaCl₂—10,5 МПа, тогда оптимальной является добавка в бетон 2% хлористого кальция от массы цемента. Аналогично определяют состав бетона с добавками ННК и ННХК (табл. 11.5).

§ 11.4. БЕТОН НА МЕЛКОМ ПЕСКЕ

● Ввиду широкого распространения в природе мелких песков и отсутствия в некоторых районах песков с удовлетворительным зерновым составом допускается применять в бетоне мелкие и тонкие пески (с $M_{кр} < 1,5$) при условии соответствующего технико-экономического обоснования.

Мелкие пески по сравнению со средними и крупными характеризуются повышенными пустотностью и удельной поверхностью и худшим зерновым составом. Вследствие этого они несколько понижают прочность бетона и уменьшают подвижность бетонной смеси, что вызывает увеличение расхода цемента для получения равнопрочных и равноподвижных бетонов. Замена крупного пес-

ка мелким в большей степени сказывается на осадке конуса и в меньшей — на удобоукладываемости бетонной смеси.

Вместе с тем мелкий песок меньше раздвигает зерна крупного заполнителя и обладает лучшей водоудерживающей способностью, в результате чего уменьшается оптимальное содержание песка в бетоне и, следовательно, в меньшей мере заметно его влияние на водопотребность бетонной смеси.

■ При определении состава бетона на мелком песке необходимо учитывать эти особенности, вводя в рассмотренный выше способ определения состава обычного тяжелого бетона следующие поправки:

1) значение В/Ц

$$В/Ц = 0,55R_{ц} / (R_6 + 0,55 \cdot 0,5R_{ц}); \quad (11.2)$$

2) содержание мелкого песка в смеси заполнителей уменьшают, т. е. уменьшают коэффициент раздвижки α в соответствии с примечаниями к табл. 10.4;

3) подвижность бетонной смеси назначают либо по удобоукладываемости (для бетона сборных железобетонных конструкций), либо по осадке конуса, обеспечивающей одинаковую удобоукладываемость и транспортабельность бетонной смеси на мелком и обычном строительном песке (для монолитного бетона). Осадку конуса (см) при одинаковой удобоукладываемости бетонной смеси составляет:

Обычный песок	1...3	4...5	6...8	9...13
Мелкий песок	1...2	2...3	4...6	7...10

Водопотребность бетонной смеси определяется по рис. 3.32, но для пониженной осадки конуса.

Пример 11.6. Определить состав бетона М300. Материалы те же, что и в примере 10.1, но вместо обычного строительного песка применяют мелкий песок с модулем крупности 1,1, водопотребностью 10% и плотностью 2,63 кг/л.

1. По формуле (11.2), $В/Ц = 0,55 \cdot 375 / (300 + 0,55 \cdot 375 \cdot 0,5) = 0,5$.
2. Для бетона на мелком песке принимают пониженную осадку конуса 2...3 см (вместо 4...5 см для бетона на обычном песке) и по графику на рис. 3.32 $В = 160 + 5(10 - 7) = 185$ л.
3. Расход цемента $Ц = 185 / 0,5 = 370$ кг/м³.
4. Коэффициент раздвижки по табл. 10.4 $\alpha = 1,4 - 0,03(10 - 7) = 1,31$.
5. По формуле (10.1), $Щ = 1000 / (0,43 \cdot 1,31 / 1,48 + 1/2,6) = 1305$ кг.
6. По формуле (10.2), $П = [1000 - (370/3,1 + 185 + 1305/2,6)] \cdot 2,63 = 490$ кг.
7. Плотность бетонной смеси 2350 кг/м³.

§ 11.5. БЕТОН ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИИ

● Бетон для гидротехнических сооружений должен обеспечивать длительную службу конструкций, постоянно или периодически омываемых водой. Поэтому в зависимости от условий службы к гидротехническому бетону помимо требований прочности предъявляют также требования по водонепроницаемости, а нередко и

по морозостойкости. Выполнение этих дополнительных требований достигается правильным определением состава бетона.

Требования по водонепроницаемости и морозостойкости дифференцированы в зависимости от характера конструкции и условий ее работы. Обычно гидротехнический бетон делят на следующие разновидности: подводный, постоянно находящийся в воде; расположенный в зоне переменного горизонта воды; надводный, подвергающийся эпизодическому омыванию водой. Кроме того, различают массивный и немассивный бетон и бетон напорных и безнапорных конструкций.

Прочность на сжатие гидротехнического бетона определяют в возрасте 180 сут. В строительстве применяют бетон классов В10...В40.

По водонепроницаемости в 180-суточном возрасте бетон делят на четыре марки: W2; W4; W6; W8. Бетон марки W2 при стандартном испытании не должен пропускать воду при давлении 0,2 МПа, бетон марок W4, W6 и W8 — при давлении соответственно 0,4; 0,6 и 0,8 МПа.

По морозостойкости гидротехнический бетон делят на пять марок: F50, F100, F150, F200, F300. В этом случае марка определяет число циклов замораживания и оттаивания (в возрасте 28 сут), после которого прочность бетона снизилась не более чем на 25%. Требование морозостойкости предъявляется лишь к тем гидротехническим бетонам, которые в конструкциях подвергаются совместному действию воды и мороза.

■ Состав гидротехнического бетона можно определить рассмотренным выше методом. Специальные свойства этого бетона, например водонепроницаемость, обеспечиваются: 1) выбором материалов, обеспечивающих требуемые морозостойкость и водонепроницаемость; 2) определением В/Ц не только из уровня прочности, но и из условия долговечности; 3) назначением расхода цемента в определенных пределах; 4) выбором коэффициента раздвижки α , обеспечивающего получение плотного и долговечного бетона; 5) применением в некоторых случаях микрозаполнителей, уменьшающих тепловыделение и объемные деформации и гарантирующих получение плотного бетона при низких расходах цемента; 6) применением воздухововлекающих добавок.

Наиболее важным является правильное назначение В/Ц, что косвенным образом обеспечивает получение бетона требуемой плотности, хотя наилучшие результаты достигаются при выполнении всего комплекса мероприятий.

Для гидротехнического бетона допускается применение портландцемента, пластифицированного и гидрофобного цемента, пуццоланового и шлакового, а в некоторых случаях сульфатостойкого цемента.

Пуццолановый цемент характеризуется большей физической и химической стойкостью при действии на бетон природных вод,

как пресных, так и минерализованных, малым тепловыделением при твердении, большей плотностью цементного камня, а следовательно, и бетонная смесь (данного состава и подвижности) отличается меньшей склонностью к водоотделению. Однако существенным недостатком бетонов на пуццолановых цементах является их меньшая морозостойкость.

В суровых климатических условиях для зоны сооружений на уровне переменного горизонта воды используют пластифицированный или обычный портландцемент. Он позволяет получать водонепроницаемые и морозостойкие бетоны, а также несколько уменьшить (на 8 ... 10 %) расход цемента и тепловыделение бетона при твердении.

Для особо тяжелых условий при наличии агрессивной воды применяют сульфатостойкий цемент. Желательно, чтобы содержание C_3A в цементе для гидротехнического бетона не превышало 3 ... 5 %, а сумма $C_3A + C_4AF$ была меньше 20 %. Предпочтительнее также повышенное содержание в цементе белита.

Для повышения водонепроницаемости и морозостойкости бетона применяют химические добавки, в первую очередь СДБ и СНВ.

Для уменьшения расхода цемента, а следовательно, тепловыделения и объемных деформаций бетона при сохранении необходимой подвижности бетонной смеси и плотности бетона в него вводят различные микрозаполнители. Для гидротехнических сооружений в качестве такой добавки используют золу-унос.

Заполнители для гидротехнического бетона должны обеспечивать его водостойкость и морозостойкость. Лучше всего применять кварцевые пески, а щебень или гравий — из изверженных или осадочных пород, водостойкость и морозостойкость которых подтверждены опытом. Особое внимание следует уделять зерновому составу заполнителя: по возможности обогащать песок, а при использовании сортового крупного заполнителя соотношения фракций рекомендуется назначать в соответствии с данными табл. 11.6.

Подвижность и удобоукладываемость бетонной смеси для гидротехнического бетона при применении поверхностно-активных до-

Таблица 11.6. Рекомендуемые соотношения между фракциями заполнителя

Наибольшая крупность зерен, мм	Содержание заполнителя, %, фракций, мм					
	5...20	5...40	20...40	20...60	40...80	80...150
40	45...60	—	40...55	—	—	—
60	35...50	—	—	50...65	—	—
80	25...35	—	25...35	—	35...50	—
80	—	50...65	—	—	35...50	—
150	15...25	—	15...25	—	25...35	30...45
150	—	30...40	—	—	25...35	30...45

Таблица 11.7. Подвижность и удобоукладываемость бетонных смесей для гидротехнических сооружений

Конструкции	Удобоукладываемость, с	Осадка конуса бетонной смеси, см			
		на обычном строительном песке		на мелкозернистом песке	
		без добавки	с добавкой	без добавки	с добавкой
Массивные бетонные и малоармированные с содержанием арматуры до 0,5 %	5...8	2...4	1...3	1...3	1...2
Железобетонные с содержанием арматуры до 1 %	3...5	4...8	3...6	3...6	2...5
То же, более 1 %	2...3	8...14	6...10	6...10	5...8

бавок и мелкозернистых песков назначают в соответствии с данными табл. 11.7.

При выборе В/Ц принимают во внимание требования к прочности, водонепроницаемости и морозостойкости бетона. В/Ц из условия прочности определяют по формуле (10.10) с учетом сроков твердения (см. § 9.1), а из условия водонепроницаемости и морозостойкости — по табл. 11.8. Из двух значений В/Ц, найденных из условия прочности и определенного по табл. 11.8, принимают наименьшее.

Расход цемента должен быть больше минимальных значений, обеспечивающих получение плотного бетона (см. табл. 10.2), и в то же время по условиям тепловыделения его не должно быть для массивных конструкций более 350 кг/м³, а немассивных — 400 кг/м³. Для получения водонепроницаемости бетона содержа-

Таблица 11.8. Максимально допустимые значения В/Ц, обеспечивающие морозостойкость бетона

Условия службы бетона	Железобетонные конструкции в воде		Бетонные и малоармированные массивные конструкции в воде	
	морской	пресной	морской	пресной
В частях сооружения, расположенных в зоне переменного горизонта воды:				
	в суровых климатических условиях	0,5	0,55	0,55
в умеренных и мягких климатических условиях	0,55	0,6	0,6	0,65
В частях сооружений, постоянно находящихся под водой:				
	напорных	0,55	0,6	0,6
безнапорных	0,6	0,65	0,65	0,65
В надводных частях сооружения, эпизодически омываемых водой	0,65	0,65	0,7	0,7

ние песка в смеси заполнителей должно быть несколько увеличено против обычных значений. В связи с этим коэффициент раздвижки α надо принимать на 0,03 ... 0,06 больше, чем указано в табл. 10.5. Оптимальное значение коэффициента α также определяют опытным путем из условия получения наиболее плотной бетонной смеси.

§ 11.6. БЕТОН ДЛЯ ДОРОЖНЫХ И АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ

● В бетонных покрытиях дорог и аэродромов основными расчетными напряжениями являются напряжения от изгиба, так как покрытие работает на изгиб, как плита на упругом основании. Поэтому при расчете состава бетона надо установить такое соотношение между его составляющими, которое обеспечивает требуемую прочность бетона на растяжение при изгибе, а также достаточную прочность на сжатие и морозостойкость. Проектную прочность дорожного бетона устанавливают в зависимости от назначения бетона (табл. 11.9).

Марки бетона по морозостойкости назначают в соответствии с климатическими условиями района строительства (табл. 11.10). Для обеспечения требуемой морозостойкости бетона и его стойкости против совместного действия хлористых солей, применяемых для борьбы с гололедом, и замораживания бетона при отрицательных температурах водоцементное отношение следует принимать для однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий

Таблица 11.9. Требования к прочности бетона для дорожных покрытий

Назначение бетона	Заданная прочность, МПа	
	при изгибе	при сжатии
Для однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий	4,0; 4,5; 5,0; 5,5	30, 35, 40, 50
Для нижнего слоя двухслойных покрытий	3,5; 4,0; 4,5	25, 30, 35
Для оснований усовершенствованных капитальных покрытий	2,0, 2,5, 3,0 3,5	10, 15, 20, 25

Таблица 11.10. Выбор марки дорожного бетона по морозостойкости

Среднемесячная температура воздуха наиболее холодного месяца	Марки по морозостойкости для бетона	
	однослойного и верхнего слоя двухслойных покрытий	нижнего слоя двухслойных покрытий и оснований усовершенствованных бетонных дорог
От 0 до 10 °С	F100	Не нормируется
От -10 до -20 °С	F150	F50
Ниже -20 °С	F200	F50

не более 0,5, для нижнего слоя двухслойных покрытий — не более 0,6, для оснований усовершенствования покрытий — не более 0,75.

Для бетона однослойных и двухслойных покрытий следует принимать портландцемент не ниже М400 с содержанием трехкальциевого алюмината менее 10 %, для оснований бетонных дорог допускается не ниже М300. Желательно использовать дорожные пластифицированные или гидрофобные цементы. Для бетона однослойных и верхнего слоя двухслойных покрытий применяют щебень, щебень из гравия и гравий только после промывки, при этом содержание в них глинистых, илстых и пылевидных частиц, определяемых отмучиванием, не должно превышать 1,5 % по массе (для нижнего слоя двухслойных покрытий 2 %).

Щебень необходимо применять из прочных горных пород: для однослойного покрытия и верхнего слоя двухслойных покрытий из изверженных пород — прочностью не менее 120 МПа, а из осадочных пород — не менее 80 МПа; для нижнего слоя двухслойных покрытий прочность щебня из изверженных пород должна быть более 80 МПа, а из осадочных — более 60 МПа.

Наибольший размер зерен щебня или гравия должен быть не менее: для верхнего слоя двухслойных покрытий — 20 мм, для однослойных и нижнего слоя двухслойных покрытий — 40 мм; для оснований покрытий — 70 мм.

Для повышения морозостойкости бетона и качества бетонной смеси в нее вводят поверхностно-активные добавки: пластифицирующие — сульфитно-спиртовая барда и воздухововлекающие — абигат натрия, мылонафт и др. Расход добавок должен быть таким, чтобы обеспечить вовлечение в бетонную смесь требуемого объема воздуха. Рекомендуется следующее содержание вовлеченного воздуха (по объему): при наибольшем размере заполнителя 40 ... 70 мм — $(4,5 \pm 1) \%$, при наименьшем размере заполнителя 10 ... 20 мм — $(5,5 \pm 1) \%$.

Так как СДБ пластифицирует смесь без заметного вовлечения в нее воздуха, то рекомендуется применять комплексные добавки, например СДБ и мылонафт или СДБ и СНВ. Ориентировочные дозировки добавок: СНВ — 0,001 ... 0,025 % в расчете на сухое вещество; мылонафт — 0,08 ... 0,05 % в расчете на товарный раствор мылонафта, содержащий 45 ... 50 % воды. СДБ вводят 0,15 ... 0,25 % в виде раствора, количество которого рассчитывают в соответствии с рекомендациями § 10.7.

Для качественного уплотнения бетонная смесь должна иметь показатели подвижности или жесткости, приведенные в табл. 11.11, определяемые непосредственно перед укладкой в покрытие или основание.

Бетонные смеси с небольшим избытком песка по сравнению с оптимальным (см. табл. 10.5) хотя и имеют несколько повышенную жесткость, но хорошо укладываются в покрытие, сохра-

Таблица 11.11. Требования к подвижности бетонной смеси

Уплотнение бетонной смеси	Осадка конуса, см	Жесткость, с
Уплотнение покрытий бетоноукладочными машинами	1...2	2...5
Уплотнение покрытий площадочными вибраторами	2...3	—
Уплотнение оснований	—	10...15

няют прочность при изгибе, не расслаиваются и дают при этом лучшее качество поверхности, поэтому такие смеси целесообразно применять для дорожных покрытий. При этом коэффициент раздвижки зерен заполнителя можно назначать 1,3 ... 1,7 (в среднем на 0,1 ... 0,2 более значений, рекомендованных в табл. 10.4), для жестких смесей — 1,25 ... 1,3.

Окончательное суждение о выборе консистенции смеси решается в результате пробного уплотнения участка покрытия — выбранная жесткость должна обеспечивать качественное уплотнение (соответствующую плотность бетона с учетом воздухововлечения).

Определение состава дорожного бетона проводят рассмотренным выше для обычного бетона расчетно-экспериментальным способом с учетом изложенных ранее дополнительных требований и рекомендаций. Порядок определения состава бетона обычный.

Вначале, исходя из прочности при изгибе, определяют требуемое V/C из формулы (5.11). Для бетона с вовлеченным воздухом ориентировочно можно принять

$$V/C = 0,36R'_{ц} / (R_{изг} + 0,36 \cdot 0,2R'_{ц}). \quad (11.3)$$

Определенные значения V/C по прочности при сжатии и морозостойкости сравнивают и наименьшее из них используют в дальнейшем расчете. Затем из условия обеспечения заданной подвижности бетонной смеси по рис. 3.32 устанавливают расход воды. При использовании бетоноукладочных машин средний расход воды для щебня крупностью 40 мм принимают 160 л, для известнякового щебня или мелкого песка расход воды увеличивают на 10 л, известнякового щебня и песка — на 20 л. При введении в бетонную смесь поверхностно-активных добавок расход воды уменьшают на 10 л. После этого подсчитывают расходы материалов на 1 м³ бетона.

Пример 11.7. Подобрать состав бетона для однослойного покрытия по прочности на изгиб 5 МПа, по прочности на сжатие 40 МПа, по морозостойкости — F200. Бетон укладывают бетоноукладочной машиной. Материалы: цемент М400 с прочностью при изгибе 6 МПа; крупный заполнитель — гранитный щебень с наибольшей крупностью 40 мм и содержанием фракций: 5...20 мм — 60%, 20...40 мм — 40%; плотность щебня — 1,48 кг/л, истинная плотность —

2,6 кг/л; мелкий заполнитель — песок средней крупности с $M_{кр} = 2,2$ и истинной плотностью 2,63 кг/м³; поверхностно-активные добавки — СДБ и СНВ.

1. Определяют V/C :

по прочности на изгиб — по формуле (11.3): $V/C = (0,36 \cdot 6) / (5 + 0,36 \cdot 0,2 \cdot 6) = 0,4$;

по прочности на сжатие — по формуле (10.10): $V/C = (0,6 \cdot 40) / (40 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40) = 0,46$;

по морозостойкости — $V/C = 0,5$.

Для дальнейшего расчета используют $V/C = 0,4 < 0,45 < 0,5$, так как при других V/C не будет обеспечен весь требуемый комплекс свойств.

2. Расход воды $V = 160 - 10 = 150$ л.

3. Расход цемента $C = 150 / 0,4 = 375$ кг.

4. Расход добавок: $D_{сдб} = 0,002 \cdot 375 = 0,75$ кг; $D_{снв} = 0,0002 \cdot 375 = 0,075$ кг.

5. По формуле (10.1), $Щ = 1000 / (1,5 \cdot 0,43 / 1,48 + 2 / 2,6) = 1220$ кг.

Пустотность щебня $P_{щ} = (2,6 - 1,48) / 2,6 = 0,48$.

Коэффициент раздвижки зерен $\alpha = 1,5(1,36 + 0,14)$.

6. По формуле (10.2), $P = [1000 - (375 / 3,1 + 150 + 45 + 1220 / 2,6)] \cdot 2,63 = 565$ кг, где 45 — ориентировочный объем вовлеченного воздуха, л.

Плотность бетона $375 + 150 + 565 + 1220 = 2310$ кг/м³. Затем состав проверяют и уточняют в пробных замесах.

§ 11.7. БЕТОН С ТОНКОМОЛОТЫМИ ДОБАВКАМИ

● *Применение тонкомолотых добавок (наполнителей) рационально в двух случаях: 1) когда по условию прочности можно допустить большее водоцементное отношение, чем требуется по условию долговечности бетона, или 2) когда прочность бетона можно обеспечить при меньшем расходе цемента, чем требуется по условию плотности.*

Расчитать количество добавки, существенно не изменяющей водопотребности смешанного цемента, можно следующим образом (рассматривая добавку как составную часть вяжущего вещества).

Для удовлетворения требований к бетону в первом случае необходимо выдержать два условия: 1) отношение $x_1 = V / (C + D)$ должно быть не менее значения, установленного по табл. 10.2, что обеспечивает необходимую плотность бетона; 2) отношение $x_2 = V / C$ не должно быть больше значения, определенного по формулам (10.10) или (10.11), что обеспечивает необходимую прочность бетона.

В первом случае, когда по условию прочности можно допустить V/C больше требуемого по долговечности, т. е. $x_2 > x_1$, $x_1 \leq V / (C + D)$ и $x_2 \leq V / C$.

Одновременное удовлетворение условий плотности и прочности достигается при

$$x_1(C + D) = x_2C, \quad (11.4)$$

откуда

$$D = C(x_2 - x_1) / x_1, \quad (11.5)$$

где C — расход цемента, обеспечивающий получение бетона заданной прочности, кг/м³.

Во втором случае, когда расход цемента из условия прочности можно принять меньше, чем требуется из условия долговечности, из равенства (11.4)

$$Ц = (Ц + Д) x_1 / x_2 \quad (11.6)$$

При минимальном расходе вяжущего, например 200 кг/м³, Ц + Д = 200 кг/м³, откуда

$$Ц = 200 x_1 / x_2, \text{ а } Д = 200 (x_2 - x_1) / x_2.$$

В современных условиях при применении суперпластификаторов расход цемента из условия прочности для бетонов низких классов часто будет меньше, чем требуемый расход из условия плотности (см. табл. 10.2), и для экономии цемента в этом случае целесообразно введение тонкомолотых добавок.

Пример 11.8. Если из условия прочности В/Ц должно быть не более 0,7, а из условия долговечности — не более 0,6, то к расходу цемента, который предположим из условия прочности равным 250 кг/м³, возможна добавка тонкомолотого минерального наполнителя:

$$Д = [(0,7 - 0,6) / 0,4] \cdot 250 = 41 \text{ кг/м}^3.$$

Содержание вяжущего вещества, следовательно, увеличивается до 290 кг/м³.

Пример 11.9. Если из условия прочности В/Ц должно быть не более 0,7, а из условия долговечности — не более 0,6, то при общем расходе вяжущего вещества 250 кг/м³ содержание цемента Ц = 250 · 0,6 / 0,7 = 214 кг/м³, а тонкомолотой добавки Д = 250 - 214 = 36 кг/м³.

В том случае, когда принятое в расчете В/Ц определяют условиями прочности, применение тонкомолотых добавок нерационально.

§ 11.8. МАЛОЩЕБЕНОЧНОЙ БЕТОН

● *Малощепеночным называют бетон с пониженным содержанием щебня или гравия.* При уменьшении содержания щебня в обычном бетоне повышается водопотребность бетонной смеси (так как возрастает удельная поверхность заполнителя), увеличивается воздухоовлечение в бетонную смесь и вследствие этого несколько уменьшаются прочность бетона и модуль деформации, возрастают усадка и ползучесть. Соответственно при введении щебня в цементно-песчаный бетон и увеличении его содержания свойства бетона изменяются в противоположном направлении. Опыты показали, что зависимость свойств бетона от содержания щебня носит линейный характер (рис. 11.3). Меняя содержание щебня в бетоне, можно регулировать его свойства. Ориентировочно считают, что

$$y = 1 + ax; \quad (11.7)$$

$$y = R_{\text{мщ.б.}} / R_{\text{мз.б.}} \quad (11.8)$$

где y — относительное изменение свойств бетона, т. е. отношение прочности малощепеночного бетона к прочности мелкозернистого

бетона; a — эмпирический коэффициент; x — отношение расхода щебня в малощепеночном бетоне к оптимальному расходу щебня в обычном бетоне.

На основе проведенных исследований при уплотнении бетонной смеси вибрацией можно принять следующие ориентировочные значения a при изменении различных свойств бетона (при сравнении бетонов с одинаковыми значениями В/Ц):

Предел прочности при изгибе	от +0,1 до 0,15
Призмная прочность	от -0,005 до 0
Модуль деформации при $\sigma = 0,5R$	от +0,2 до 0,3
Усадка	от -0,3 до -0,7

С повышением степени уплотнения цементно-песчаной смеси свойства мелкозернистого бетона при одинаковом В/Ц все меньше будут отличаться от свойств обычного бетона. Поэтому значение коэффициента a правильнее определять путем испытания бетона при $x_1 = 0$ и $x_2 = 1$, т. е. путем испытания мелкозернистого и обычного бетонов, приготовленных и уплотненных по технологии, предназначенной к применению.

Малощепеночный бетон используют главным образом тогда, когда для железобетонных конструкций приходится применять дорогостоящий привозной щебень. В этом случае состав бетона определяют с учетом допустимого перерасхода цемента, который устанавливают на основе экономических расчетов. Другой случай расчета — введение щебня в мелкозернистый бетон (если позволяют размеры конструкции и армирование) с целью улучшения отдельных его свойств, например для увеличения модуля упругости или уменьшения ползучести и усадки. Состав малощепеночного бетона определяют на основе расчетно-экспериментального способа для обычного (тяжелого) бетона с уточнением расхода

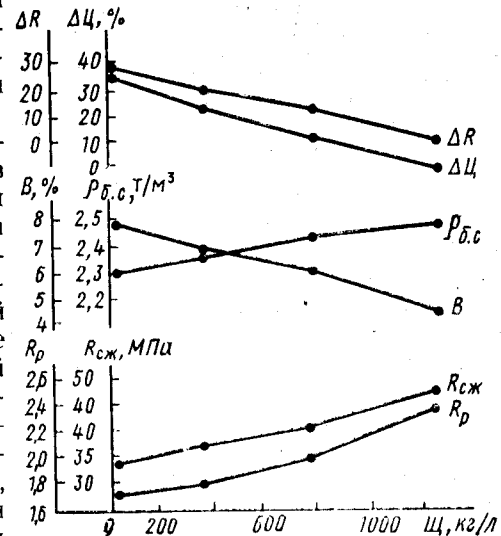


Рис. 11.3. Зависимость свойств малощепеночного бетона от содержания щебня:

ΔR — снижение прочности при сжатии; ΔЦ — увеличение расхода цемента для получения равнопрочного бетона и равноподвижной бетонной смеси при уменьшении расхода щебня; V — воздухоовлечение в бетонную смесь; $R_{\text{б.с}}$ — плотность бетонной смеси; $R_{\text{сж}}$ и $R_{\text{р}}$ — прочности бетона при сжатии и растяжении

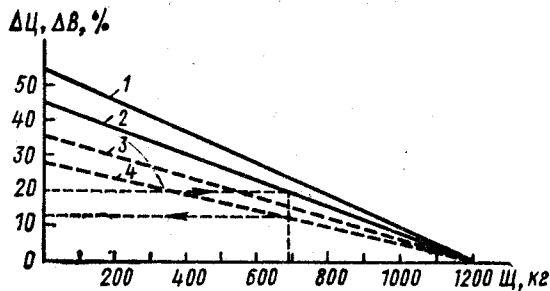


Рис. 11.4. График для расчета состава малощебеночного бетона:

1 — увеличение расхода цемента для получения бетонных смесей с одинаковой осадкой конуса; 2 — увеличение расхода воды для получения бетонных смесей с одинаковой осадкой конуса; 3, 4 — то же, с одинаковой удобоукладываемостью

2. По графикам (см. рис. 3.32) определяют расходы воды в зависимости от заданной подвижности бетонной смеси.

3. Подсчитывают расход цемента: $\text{Ц} = \text{В} : \text{В}/\text{Ц}$.

4. Далее возможны следующие варианты решения:

а) в зависимости от допустимого перерасхода цемента и принятого способа уплотнения по рис. 11.4 определяют необходимую добавку воды, цемента и расход щебня, а затем уточняют расходы воды и цемента для получения равноподвижных и равнопрочных бетонов;

б) в зависимости от требуемых свойств мелкозернистого бетона определяют добавку щебня:

$$\text{Щ} = \frac{(y-1)1200}{a}, \quad (11.9)$$

где y — требуемое изменение свойств ($y \leq 1+a$); 1200 — средний расход щебня в обычном бетоне, $\text{кг}/\text{м}^3$.

По рис. 11.4 в зависимости от значения Щ определяют необходимое изменение расхода воды и цемента.

5. Находят расход песка по формуле (10.2).

6. Делают пробные замесы и по их результатам корректируют состав бетона. При этом пользуются известными методами, сохраняя расход цемента постоянным: если необходимо увеличить прочность бетона, уменьшают расход воды; если требуется повысить подвижность бетонной смеси, увеличивают расход щебня за счет песка.

Пример 11.10. Определить состав малощебеночного бетона с заданной прочностью 30 МПа при удобоукладываемости бетонной смеси 4...6 с и допустимым перерасходе цемента 20%. Цемент активностью 37,5 МПа. Песок круп-

материалов по зависимости, устанавливающей соотношение цемента и воды, необходимое для получения равнопрочных и равноподвижных бетонов при разном расходе щебня. Окончательный расход материалов уточняют на пробных замесах.

■ Состав малощебеночного бетона определяют в следующем порядке:

1. По формулам (10.10) и (10.11) находят требуемое $\text{В}/\text{Ц}$.

ный плотностью 2,6 $\text{кг}/\text{л}$; щебень гранитный плотностью 2,6 $\text{кг}/\text{л}$ и предельной крупностью 40 мм.

1. По формуле (10.10), $\text{В}/\text{Ц} = 0,6 \cdot 37,5 / (30 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 37,5) = 0,54$.

2. По графикам (см. рис. 3.32), $\text{В} = 150 \text{ л}/\text{м}^3$.

3. Расход цемента $\text{Ц} = 150 / 0,54 = 280 \text{ кг}/\text{м}^3$.

4. По заданию расход цемента может быть увеличен на 20%. Согласно рис. 11.4, расход воды при этом увеличивают на 14%, а расход щебня составляет приблизительно 700 $\text{кг}/\text{м}^3$. Окончательно $\text{Ц} = 280 \cdot 1,2 = 335 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\text{В} = 150 \times 1,14 = 170 \text{ л}/\text{м}^3$.

5. По формуле (10.2), $\text{П} = [1000 - (335/3,1 + 170 + 770/2,6)] \cdot 2,6 = 1175 \text{ кг}/\text{м}^3$. Расчетная плотность $335 + 170 + 1175 + 700 = 2380 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Окончательный состав уточняют пробными затвердениями.

§ 11.9. ЛИТОЙ БЕТОН

● *Литой бетон готовят при высоком расходе воды, что требует уделять особое внимание предупреждению расслаивания бетонной смеси.* Для ее предотвращения осуществляют мероприятия, способствующие повышению водоудерживающей способности смеси: 1) используют цементы, обладающие достаточной водоудерживающей способностью; 2) применяют суперпластификаторы, воздухововлекающие или водоудерживающие добавки; 3) ограничивают значения $\text{В}/\text{Ц}$, чтобы избежать расслоения цементного теста; 4) увеличивают содержание песка в бетонной смеси, повышая значения коэффициента α .

Для приготовления литых бетонов желательно использовать портландцемент М400...500 и быстротвердеющий цемент. Такие цементы вследствие оптимального гранулометрического состава зерен и высокой тонкости помола обладают хорошей водоудерживающей способностью при высоких значениях $\text{В}/\text{Ц}$. Кроме того, быстрое схватывание цементного теста уменьшает возможность его расслаивания, так как последнее может происходить только до момента затвердевания бетона.

Водоудерживающую способность цементного теста можно оценить по максимальному значению $\text{В}/\text{Ц}_{\text{кр}}$, при котором еще не наблюдается его расслаивания. Ориентировочно $\text{В}/\text{Ц}_{\text{кр}} = 1,65 \text{ НГ}$, где НГ — водоцементное отношение, соответствующее нормальной густоте цементного камня.

При определении состава бетона определяют $\text{В}/\text{Ц}_{\text{ист}}$ и сравнивают с $\text{В}/\text{Ц}_{\text{кр}}$, т. е. должно соблюдаться условие

$$(\text{В} - \text{В}_\text{п} - \text{В}_\text{щ}) / \text{Ц} \leq \text{В}/\text{Ц}_{\text{кр}},$$

где Ц , В , П , Щ — расход цемента, воды, песка и щебня, $\text{кг}/\text{л}$; $\text{В}_\text{п}$, $\text{В}_\text{щ}$ — водопотребность песка и щебня.

При использовании способов, повышающих лептизацию зерен цемента или воздухововлекающих добавок, можно принимать $\text{В}/\text{Ц}_{\text{кр}} = 1,8 \text{ НГ}$. В этом случае уменьшается опасность расслоения литой бетонной смеси.

Значения коэффициента раздвижки α при определении расхода щебня увеличивают на 0,1 ... 0,2, однако окончательный расход заполнителей уточняют по результатам пробных замесов, добиваясь высокой связанности бетонной смеси и минимального водоотделения на поверхности опытных образцов бетона.

При применении литого бетона следует учитывать, что повышение подвижности смеси при прочих равных условиях ведет к увеличению расхода цемента, поэтому в литом бетоне для экономии цемента целесообразно использовать суперпластификаторы и комплексные добавки на их основе, включающие, как правило, воздухововлекающий компонент. Экономически обосновано использование литых бетонов в случае, когда бетон низкой прочности готовят на высокопрочном цементе. Тогда расход цемента назначается по условию получения плотной структуры бетона (см. табл. 10.2) и этот расход превышает расход цемента, который необходим для получения заданной прочности бетона. Это позволяет увеличить расход воды и получить с использованием суперпластификаторов литые бетонные смеси без увеличения требуемого расчетом расхода цемента. При применении цемента М500...600 это условие выполняется для бетонов с прочностью менее 20 МПа.

При необходимости бетонирования изделий сложной конфигурации с густой арматурой и в ряде других случаев применение литых смесей оказывается целесообразным вследствие значительно-го снижения трудоемкости и сроков изготовления изделий и конструкций. При этом возможно использование литых бетонов прочностью до 60 МПа. Однако во всех случаях применения литой бетонной смеси следует уделять особое внимание экономии цемента, соответствующим образом выбирая исходные материалы и используя все известные приемы по сокращению расхода цемента в бетоне.

ГЛАВА 12

МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН

§ 12.1. ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

● Для изготовления тонкостенных железобетонных конструкций применяют мелкозернистый бетон, не содержащий щебня. Армируя этот бетон стальными ткаными сетками, получают армоцемент — высокопрочный материал для тонкостенных конструкций. Мелкозернистый бетон можно также использовать для изготовления железобетонных конструкций в районах, где отсутствуют щебень и гравийно-песчаная смесь.

Свойства мелкозернистого бетона определяются теми же факторами, что и обычного бетона. Однако мелкозернистый цемент-

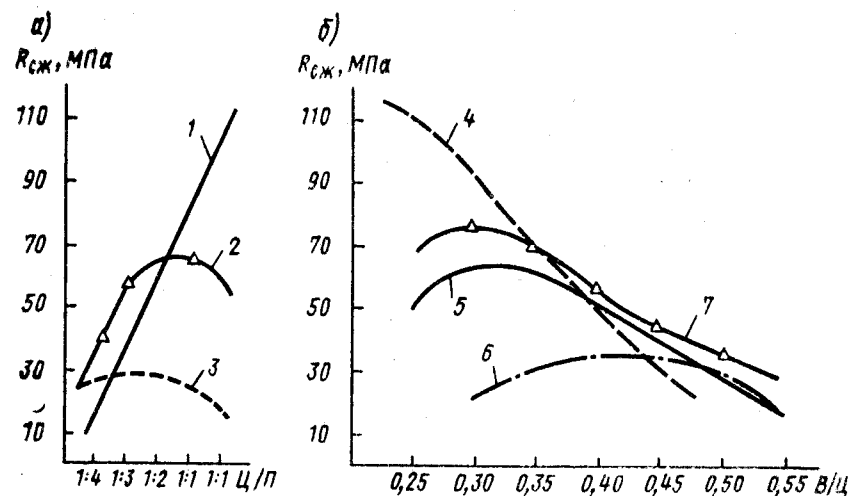


Рис. 12.1. Зависимость прочности песчаного бетона от состава бетона (а) и В/Ц (б):

1 — В/Ц=0,3; 2 — В/Ц=0,4; 3 — В/Ц=0,5; 4 — Ц/П=1,0; 5 — Ц/П=1:2; 6 — Ц/П=1:4; 7 — обычный бетона (для сравнения)

но-песчаный бетон имеет некоторые особенности, обусловленные его структурой, для которой характерны большая однородность и мелкозернистость, высокое содержание цементного камня, отсутствие жесткого каменного скелета, повышенные пористость и удельная поверхность твердой фазы.

На рис. 12.1,а приведены зависимости прочности песчаного бетона от его состава. При $В/Ц=0,3$ зависимость прочности от расхода цемента прямолинейна: уменьшение расхода цемента приводит к резкому понижению прочности бетона, так как при малом содержании цемента смесь становится все менее удобообрабатываемой, хуже уплотняется, а ее плотность и соответственно прочность постепенно уменьшаются. Наивысшую прочность показывает в этом случае цементный камень.

При более высоких значениях водоцементного отношения ($В/Ц=0,4$ и выше) наивысшая прочность бетона достигается при определенном оптимальном соотношении между цементом и песком. При этом соотношении достигается максимальная плотность бетонной смеси. При меньших расходах цемента удобообрабатываемость смеси постепенно снижается, что затрудняет ее укладку и приводит к постепенному понижению прочности и плотности бетона. При более высоком содержании цемента возрастает количество избыточной воды в бетоне, соответственно увеличивается пористость и понижается прочность.

Для каждого состава бетона имеется оптимальное значение $В/Ц$, при котором получаются наивысшие прочность и плотность

бетона (рис. 12.1,б). Если построить обобщенную зависимость прочности песчаного бетона разного состава от В/Ц для оптимальных или средних значений прочности, достигаемых при разных соотношениях между песком и щебнем, то кривые, выражающие эти зависимости, будут иметь более крутой наклон и будут пересекаться с подобными кривыми для обычного бетона при В/Ц, близких к 0,4. В случае более низких В/Ц при обеспечении хорошего уплотнения можно получить песчаные бетоны с прочностью выше, чем у обычных бетонов на крупном заполнителе. Однако такие бетоны требуют большого расхода цемента и могут применяться только для специальных конструкций при соответствующем технико-экономическом обосновании. При более высоких В/Ц песчаные бетоны обычно имеют прочность ниже, чем обычные бетоны на прочном крупном заполнителе. Степень понижения прочности зависит от качества применяемых материалов и технологии уплотнения бетонной смеси.

В ряде случаев при приготовлении цементно-песчаной смеси и уплотнении ее обычным вибрированием в нее вовлекается воздух, распределенный в виде мельчайших пузырьков по всему объему смеси. Вовлечение воздуха, которое может достигать 3...6% и более, повышает пористость бетона и снижает его прочность. Воздухововлечение увеличивается с повышением жесткости смеси. Поэтому при необходимости получить плотные и прочные песчаные бетоны следует применять такие методы их уплотнения, которые сводили бы воздухововлечение к минимуму.

Песок обладает более высокой пустотностью, чем смесь песка и щебня. При невысоком содержании цемента в смесях более тощих, чем 1:3, цементного теста может не хватить для обмазки зерен песка и заполнения всех пустот. В этом случае возникает дополнительный объем пор, обусловленный нехваткой цементного теста, что вызывает увеличение общей пористости бетона и снижение его прочности. Этим обстоятельством объясняется сложность получения достаточно прочных песчаных бетонов при невысоких расходах цемента (200...300 кг/м³), характерных для обычного бетона. Учитывая изложенные выше особенности влияния различных факторов на прочность песчаного бетона, обобщенную зависимость его прочности от различных факторов можно представить в виде следующего выражения:

$$R_{н.г} = AR_{ц} \left(\frac{Ц}{В + ВВ} - 0,8 \right),$$

где В, Ц — соответственно расход воды и цемента, кг/м³; ВВ — объем вовлеченного воздуха, л; А — эмпирический коэффициент, для материалов высокого качества А=0,8, среднего качества — 0,75 и низкого качества — 0,65.

Коэффициент А целесообразно определять путем испытаний, так как качество материала, в частности песка, может значитель-

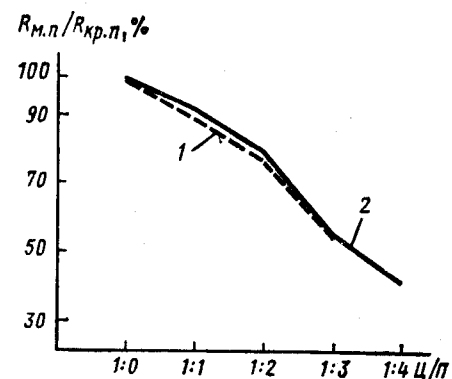


Рис. 12.2. Влияние мелкого песка на прочность песчаного бетона

1 — снижение максимально достижимых значений прочности бетона (при оптимальных В/Ц); 2 — снижение прочности равноподвижных смесей (расплав конуса на встряхивающем столике 130 мм)

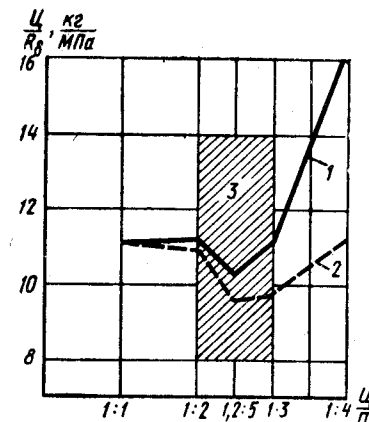


Рис. 12.3. Удельный расход цемента в мелкозернистых бетонах различных составов:

1 — сравнение при оптимальных В/Ц; 2 — сравнение при одинаковой консистенции; 3 — зона оптимальных составов

но повлиять на его значения. В песчаном бетоне применение мелкого песка с повышенными удельной поверхностью и пустотностью приводит к необходимости увеличения расхода воды с целью сохранения заданной подвижности бетонной смеси и заметно снижает прочность бетона (рис. 12.2), в том числе заметно снижает максимально достижимую прочность бетона для определенного состава. Степень снижения прочности бетона зависит как от качества песка, так и от состава бетона, увеличиваясь с уменьшением расхода цемента.

Если в обычном бетоне замена крупного песка мелким понижает прочность всего на 5...10%, то в мелкозернистом бетоне прочность может уменьшиться на 25...30%, а максимальная прочность песчаного бетона состава 1:2...1:3, которой можно достигнуть при определенной интенсивности уплотнения, иногда снижается в 2...3 раза. Поэтому для мелкозернистых бетонов желательно использовать крупные чистые пески или обогащать мелкий песок более крупными высевками от дробления камня, мелким гравием.

Состав мелкозернистого бетона и качество песка определяют эффективность использования цемента в бетоне. На рис. 12.3 приведен удельный расход цемента на единицу прочности в мелкозернистых бетонах разных составов на песке средней крупности. Наиболее экономичными в этом случае являются составы 1:2...1:3, обладающие, как правило, и наибольшей плотностью. Для мелкозернистого бетона на мелком песке оптимальными оказыва-

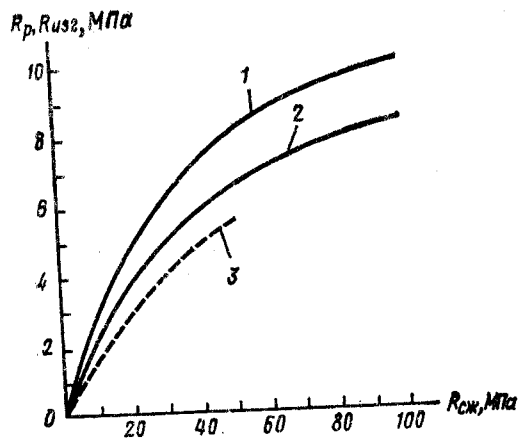


Рис. 12.4. Зависимость прочности бетона при изгибе и растяжении от его прочности при сжатии:

1 — $R_{изг}$ для песчаного бетона; 2 — $R_{изг}$ для обычного бетона; 3 — R_p для песчаного бетона

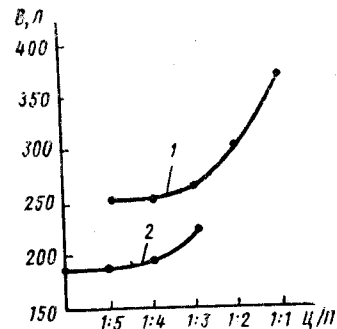


Рис. 12.5. Водопотребность бетонной смеси с осадкой конуса 2...4 см:

1 — цементно-песчаная смесь разного состава на песке средней крупности; 2 — обычная бетонная смесь на гравии с предельной крупностью 10 мм

ются составы 1:1...1:1,5, а минимальный удельный расход цемента увеличивается до 12 кг/МПа.

Мелкозернистый бетон обладает повышенной прочностью при изгибе (рис. 12.4), водонепроницаемостью и морозостойкостью. Поэтому его можно использовать для дорожных покрытий в районах, где нет хорошего щебня, для труб и гидротехнических сооружений.

■ Меньшая крупность и повышенная удельная поверхность заполнителя (песка) увеличивают водопотребность бетонной смеси (рис. 12.5), способствуют вовлечению в бетонную смесь воздуха при вибрировании. Водопотребность цементно-песчаной смеси определяется не только требуемой подвижностью, как у обычного бетона, но и ее составом. Например, для получения бетонной смеси с осадкой конуса 2 см при применении песка средней крупности расход воды для состава бетона 1:3 равен 260 л/м³, а для состава бетона 1:2 — 300 л/м³.

В результате для получения равнопрочного бетона и равноподвижной бетонной смеси в мелкозернистом бетоне на 20...40% возрастает расход цемента по сравнению с обычным бетоном. Для снижения расхода цемента следует применять химические добавки, эффективное уплотнение песчаных бетонных смесей и крупные пески с оптимальным зерновым составом. В цементно-песчаных смесях с высоким содержанием цемента полезно использовать ССБ, комплексную добавку, состоящую из СДБ и ускорителя твердения цемента, суперпластификаторы.

Хорошее уплотнение цементно-песчаной смеси достигается прессованием, трамбованием, вибрированием с пригрузом, вибровакуумированием, роликовым уплотнением (см. гл. 15). Например, при обычном вибрировании образцов мелкозернистого бетона на цементе М400 состава 1:2 в одном из опытов в возрасте 28 сут была достигнута максимальная прочность 55 МПа при плотности 2,3 т/м³, а при трамбовании прочность бетона повысилась до 77 МПа при плотности 2,4 т/м³.

Для изготовления тонкостенных железобетонных конструкций обычно применяют цементно-песчаную смесь малоподвижной консистенции составов 1:3...1:4, а для изготовления армоцемента — более жирные составы 1:2. При формировании изделий в двусторонней опалубке используют литые цементно-песчаные смеси, а при прессовании или вибрировании с пригрузом — жесткие бетонные смеси.

Испытания мелкозернистого бетона целесообразно проводить на образцах малого размера. Его прочность можно оценить испытанием половинок балочек 4×4×16 см, а подвижность бетонной смеси — распылом конуса на встряхивающем столике, как при испытании цемента в пластичном растворе, или по удобоукладываемости при вибрировании малого конуса (ОК=10 см) в форме 10×10×10 см (по аналогии со способом Б. Г. Скрамтаева для обычного бетона). Испытания на встряхивающем столике позволяют оценить подвижность мелкозернистых смесей, наиболее употребительных при изготовлении тонкостенных конструкций, с большей степенью точности, чем другие методы.

Большое значение при определении состава цементно-песчаного бетона для армоцементных конструкций имеет правильная оценка поведения цементно-песчаной смеси в условиях густого армирования стальной тканой сеткой. Такая оценка может быть сделана путем определения формуемости армоцемента, под которой подразумевается способность цементно-песчаной смеси плотно укладываться в данных условиях и которая, по существу, характеризует длительность процесса изготовления армоцементной конструкции.

Формуемость армоцемента определяют на приборе, показанном на рис. 12.6. Она зависит от подвижности цементно-песчаной смеси и схемы армирования. Прибор состоит из нижней и верхней прижимных рамок 4, соединяемых на болтах, между которыми может набираться любая схема армирования 3. Нижняя рамка имеет лапки 6 для крепления к обычной металлической форме. На верхнюю рамку с помощью кронштейнов крепится металлический полый цилиндр 5. Нижнее отверстие цилиндра закрывается задвижкой 2. Формуемость армоцемента определяют двумя способами: на проход и на расплыв; в последнем случае под нижней прижимной рамкой укладывают пластинку 1 из оргстекла.

Для определения формуемости прибор закрепляют с помощью

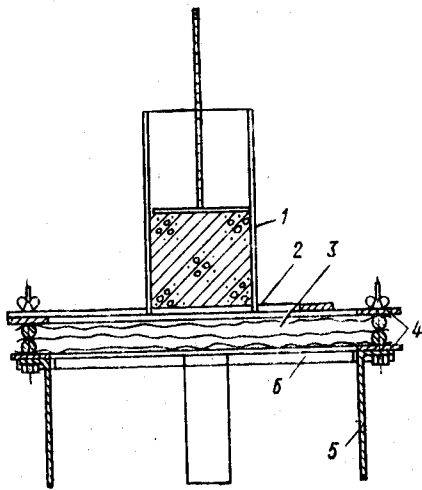


Рис. 12.6. Схема прибора для определения формуемости армоцемента:

1 — стальной цилиндр; 2 — задвижка; 3 — арматурная сетка; 4 — фиксирующие рамки; 5 — захваты для крепления прибора к стандартной форме 15×15×15 см; 6 — пластинка для оргстекла

два значения формуемости: на проход и на расплыв. Наибольшее значение для армоцемента имеет формуемость на проход, которая и приводится в графиках, использованных в расчетах.

§ 12.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

Наиболее просто и точно состав цементно-песчаного бетона определяют расчетно-экспериментальным путем. Вначале рассчитывают предварительный состав бетона, обеспечивающий получение заданной подвижности цементно-песчаной смеси и заданную прочность бетона. Этот состав затем проверяют путем пробных затворений и, если необходимо, уточняют.

■ Состав цементно-песчаного бетона рассчитывают в следующем порядке:

1. Определяют водоцементное отношение, необходимое для получения заданной прочности бетона:

$$B/C = AR_{\text{ц}} / (R_0 + 0,8AR_{\text{ц}}), \quad (12.2)$$

где A — коэффициент, для высококачественных материалов $A = 0,8$; для материалов среднего качества — $0,75$ и для цемента низких марок и мелкого песка — $0,65$; $R_{\text{ц}}$ — активность цемента,

лапок на обычной форме размером 15×15×15 см, установленной на вибростол. В металлический цилиндр помещают навеску цементно-песчаной смеси 300 г, которая позволяет определить формуемость на проход и по расплыву при различном армировании (при толщине пакета до 5 см). Смесь предварительно уплотняют штыкованием или вибрированием, закрывая нижнее отверстие цилиндра. После этого задвижку вынимают и включают вибратор. Отрезок времени (с), необходимый для вытекания навески цементно-песчаной смеси из цилиндра, что соответствует моменту, когда уровень цементно-песчаной смеси выравнивается с нижним краем цилиндра, определяет формуемость армоцемента. В зависимости от того, каким способом проводилось испытание, можно получить

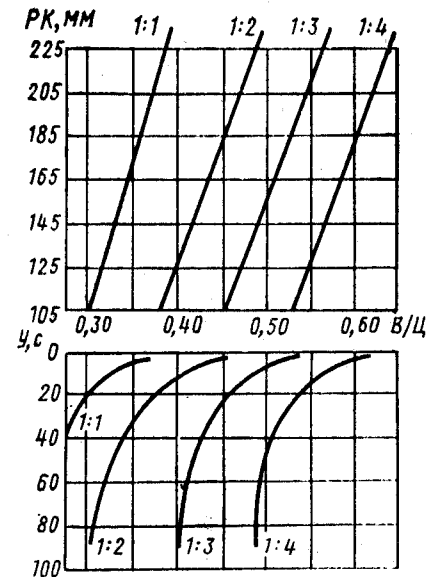


Рис. 12.7. График для выбора соотношения между цементом и песком средней крупности (водопотребность 7%), которое обеспечивает заданную подвижность — расплыв конуса РК и удобоукладываемость U цементно-песчаной смеси при определенном водоцементном отношении B/C

Примечания: 1. Если применяют мелкий песок с водопотребностью свыше 7%, содержание его уменьшают на 5% на каждый процент увеличения водопотребности, при использовании крупного песка с водопотребностью ниже 7% содержание его увеличивают на 5% на каждый процент уменьшения водопотребности. 2. Если водопотребность песка неизвестна, то соотношение между цементом и песком корректируют по модулю крупности песка на основании рис. 12.8

удобоукладываемость цементно-песчаной смеси при определенном B/C , установленном по формуле (12.2). На графиках показана подвижность и удобоукладываемость цементно-песчаной смеси, приготовленной на песке с модулем крупности 2,5 и водопотребностью 7%. При применении другого песка влияние его крупности на подвижность (удобоукладываемость) цементно-песчаной смеси учитывают в соответствии с примечаниями к рис. 12.7 или, если неизвестна водопотребность песка, по графику на рис. 12.8.

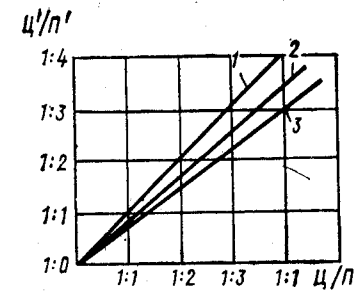


Рис. 12.8. График для корректировки соотношения C/P' , обеспечивающего заданную подвижность цементно-песчаной смеси в зависимости от крупности песка:
1 — $M_{\text{кр}} = 2,5$; 2 — $M_{\text{кр}} = 1,5$; 3 — $M_{\text{кр}} = 0,75$ (C/P' — соотношение для песка средней крупности, принятое по рис. 12.7)

МПа; R_0 — прочность половинок балочек размером 4×4×16 см из цементно-песчаного бетона в возрасте 28 сут, выдержанных в нормальных условиях, МПа.

Формула действительна при коэффициенте уплотнения бетонной смеси более 0,97. Если такое уплотнение не может быть обеспечено, то необходимо учитывать возможное снижение прочности бетона примерно на 5% на каждый процент недоуплотнения.

2. По графикам рис. 12.7 определяют соотношение между цементом и песком, обеспечивающее заданную подвижность или

3. Рассчитывают расход цемента:

$$Ц = 1000 / (1/\rho_{ц} + V/Ц + n/\rho_{п}), \quad (12.3)$$

где $\rho_{ц}$, $\rho_{п}$ — истинные плотности цемента и песка; n — отношение между цементом и песком, определяемое в соответствии с указаниями п. 2.

Формула (12.3) выведена из уравнения

$$Ц/\rho_{ц} + V + П/\rho_{п} = 1000,$$

полученного из условия, что сумма абсолютных объемов составных частей плотного цементно-песчаного бетона (л) равна 1 м³, или 1000 л готового плотного бетона, если в нем нет вовлеченного воздуха или объем воздушных пор очень мал — менее 1,5% (при уплотнении бетона прокатом, прессованием, трамбованием, центрифугированием).

При уплотнении песчаного бетона вибрированием в него обычно вовлекается воздух (2...8% по объему). В этом случае расход цемента

$$Ц = (1000 - BV) / (1/\rho_{ц} + V/Ц + П/\rho_{п}), \quad (12.4)$$

где BV — объем вовлеченного воздуха, л; в ориентировочных расчетах для подвижной бетонной смеси на среднем и крупном песке можно принять $BV = 20$ л, на мелком песке — 30 л, жесткой смеси на среднем и крупном песке — 50 л, то же, на мелком песке — 70 л.

Действительное количество вовлеченного воздуха уточняют в опытных замесах.

4. Определяют расход воды:

$$В = ЦВ/Ц. \quad (12.5)$$

5. Рассчитывают расход песка:

$$П = nЦ. \quad (12.6)$$

6. На пробных замесах проверяют подвижность или удобоукладываемость цементно-песчаной смеси и при необходимости вносят поправки в состав бетона. Определяют плотность свежесушеного бетона и на контрольных образцах проверяют прочность цементно-песчаного бетона. По плотности свежесушеной цементно-песчаной смеси устанавливают окончательный расход материалов на 1 м³ бетона. Эта операция имеет важное значение при расчете состава цементно-песчаного бетона, так как может случиться (в тощих смесях, при применении мелкого песка и т. д.), что цементного теста не хватит для заполнения пустот между зернами песка и уложенный бетон будет иметь определенное дополнительное количество пор, которое необходимо учитывать при подсчете материалов на 1 м³ бетона, или, наоборот, ока-

жется, что в расчете учтено большее количество вовлеченного воздуха, чем его будет в действительности.

Пример 12.1. Определить состав бетона с требуемой прочностью 30 МПа для тонкостенной железобетонной плиты с удобоукладываемостью цементно-песчаной смеси 7...8 с. Материалы: порландцемент М400, песок обычный строительный с модулем крупности $M_{кр} = 1,5$, истинной плотностью 2,63 кг/л. Условия твердения нормальные.

1. По формуле (12.2), $V/Ц = 0,75 \cdot 4000 \cdot 0,1 / (30 + 0,8 \cdot 0,75 \cdot 400 \cdot 0,1) = 0,55$.

2. По графику на рис. 12.7 устанавливают отношение $Ц : П$ (или $1 : n$), которое по интерполяции равно $1 : 4,3$. Вводят поправку, учитывающую крупность песка, т. е. по графику на рис. 12.8 определяют действительное отношение $1 : n$ ($Ц : П$), которое равно $1 : 3,7$.

3. Расход цемента $Ц = 1000 / (1/3,7 + 0,55 + 3,7/2,63) = 440$ кг.

4. Расход воды $В = 440 \cdot 0,55 = 240$ л.

5. Расход песка $П = 3,7 \cdot 440 = 1630$ кг.

6. Расчетная плотность бетона

$$\rho'_б = 440 + 140 + 1630 = 2310 \text{ кг/м}^3.$$

7. Проводят пробные затворения. Допустим, окажется, что цементно-песчаная смесь показала заданную удобоукладываемость без корректировки состава, а действительная плотность смеси оказалась $\rho'_{б,д} = 2210$ кг/м³. Определяют действительный расход материалов на 1 м³ песчаного бетона:

$$Ц = 0,96 \cdot 400 = 420 \text{ кг} (0,96 = 2210/2310); \quad В = 0,96 \cdot 240 = 230 \text{ кг}; \quad П = 0,96 \cdot 1630 = 1560 \text{ кг}.$$

Другие коррективы вносят в состав после испытания контрольных образцов.

§ 12.3. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН ДЛЯ АРМОЦЕМЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При определении состава бетона для армоцементных конструкций необходимо учитывать формуемость армоцемента. На формуемость армоцемента большое влияние оказывает схема армирования (в частности, число сеток, расстояние между ними и размер ячейки сетки). Чем гуще армирование, тем более интенсивным и продолжительным должно быть вибрирование для уплотнения цементно-песчаной смеси определенной подвижности.

Формуемость армоцемента (с) следует выбирать в зависимости от принятого способа уплотнения:

Вручную	5...15
Вибрирование с частотой 3000 кол/мин	15...40
То же, 6000 кол/мин	40...60
Вибрирование с пригрузом	60...100

При расчете состава цементно-песчаной смеси для армоцементных конструкций подвижность смеси определяют в зависимости от требуемой формуемости и заданной схемы армирования по графику рис. 12.9. График составлен для стальной тканой сетки с ячейкой 7×7 мм; если применяют сетку с ячейкой 5×5 мм, то

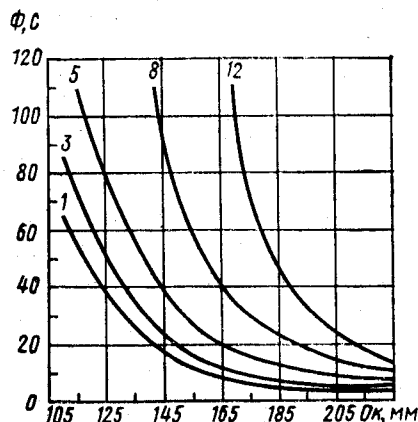


Рис. 12.9. График для определения подвижности ОК цементно-песчаной смеси в зависимости от требуемой формуюемости Φ армоцемента в конструкциях толщиной 2...3 см:
1, 3, 5, 8, 12 — число сеток

требуемостью 5 %, плотностью 2,65 кг/л, наибольшей крупностью 5 мм. Цементно-песчаную смесь уплотняют вибрированием, т. е. формуемость смеси должна быть 20 с. Условия твердения нормальные.

1. Определяют $V/C = 0,75 \cdot 400 / (400 + 0,8 \cdot 0,75 \cdot 400) = 0,47$.
2. Требуемая подвижность цементно-песчаной смеси (по рис. 12.9) $0,7 \times 165 = 115$ мм.
3. Проверяют D_{\max} : $D_{\max} = \sqrt{4^2 + (10/2)^2} - 0,3 = 6,1$ мм. Следовательно, имеющийся песок может быть применен сразу без предварительного отсева круглых фракций.
4. По рис. 12.7 определяют соотношение $C:P$, обеспечивающее требуемую подвижность цементно-песчаной смеси: $C:P = 1:3,2$, а с учетом водопотребности песка содержание его увеличивается на $0,05(7-5) = 0,3$, т. е. окончательно $C:P = 1:3,5$. Далее расчет выполняют, как в примере 12.1, но с учетом вовлечения воздуха при вибрировании.
5. Расход цемента $C = (1000 - 20) / (1/3,1 + 0,47 + 3,5/2,65) = 465$ кг.
6. Расход воды $V = 465 \cdot 0,47 = 218$ л.
7. Расход песка $P = 3,5 \cdot 465 = 1625$ кг.
8. Плотность бетонной смеси $\rho'_{б.см} = 465 + 218 + 1625 = 2308$ кг/м³.

§ 12.4. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН С МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕМ

Для экономии цемента в мелкозернистый бетон иногда вводят микронаполнители — золу, известняковую муку, молотый песок и др. Состав в этом случае определяют обычным методом, рассматривая цемент и микронаполнитель как единое вяжущее. Активность вяжущего и его влияние на водопотребность бетонной смеси зависят от содержания и свойств микронаполнителя. Влияние вяжущего на водопотребность устанавливают предварительными ис-

подвижность смеси (определяемая по графику) увеличивается на 40 %, а при сетке с ячейкой 10×10 мм уменьшается на 30 %.

Наибольшая крупность песка D_{\max} , допустимая по условиям армирования,

$$D_{\max} = \sqrt{h^2 + (l/2)^2} - 0,3, \quad (12.7)$$

где h — расстояние между сетками, мм; l — размер ячейки стальной тканой сетки, мм.

Формула действительна при $0 < l < h$. Остальной состав смеси определяют по изложенной выше методике.

Пример 12.2. Подобрать состав цементно-песчаной смеси для армоцементной кровли толщиной 2 см, армированной пятью сетками размером 10×10 мм через 4 мм. Бетон прочностью 40 МПа. Материалы: портландцемент М400, песок крупный с водо-

пытаниями. Для ориентировочных расчетов можно принять, что уменьшение активности цемента пропорционально увеличению содержания микронаполнителя: при содержании микронаполнителя 20 % активность вяжущего уменьшается на 20 %.

Влияние микронаполнителя на водопроводность бетонной смеси можно учесть, если известна его водопотребность. В этом случае количество воды, которое надо добавить к расходу воды или, наоборот, на которое надо уменьшить расход воды,

$$V_d = (V_{\text{мн}} - \text{НГ}) D, \quad (12.8)$$

где $V_{\text{мн}}$ — водопотребность микронаполнителя (относительная величина); НГ — нормальная густота цементного теста, в среднем 0,25; D — содержание добавки-наполнителя на 1 м³ бетона, кг.

Водопотребность бетонной смеси можно определить раздельным учетом водопотребности цемента и микронаполнителя.

После подбора состава бетона и проведения пробных замесов окончательный расход материалов устанавливают с учетом действительной плотности по следующему формулам:

$$C = \rho'_{см} / (1 + n + m + V/C); \quad (12.9)$$

$$P = Cn; \quad (12.10)$$

$$D = Cm; \quad (12.11)$$

$$V = CV/C, \quad (12.12)$$

где C, P, D — содержание цемента, песка и добавки-наполнителя кг/м³ смеси, $n, m, V/C$ — отношения песка, добавки-наполнителя и воды к цементу по массе.

Пример 12.3. Задание и материалы те же, что и в примере 12.1. Для экономии цемента использована добавка золы в количестве 20 % от массы цемента. Водопотребность золы 30 %.

1. Активность смешанного вяжущего $A_b = (400 - 0,2/400) / 0,1 = 32$ МПа.
2. По формуле (12.3), $V/C = 0,75 \cdot 32 / (30 + 0,8 \cdot 0,75 \cdot 32) = 0,49$.
3. По графику на рис. 12.7 устанавливают отношение $(C+D)/P$, которое по интерполяции равно 3,7. С учетом графика на рис. 12.7 окончательное отношение $(C+D)/P = 3,5$.
4. По формуле (12.3), $C+D = 1000 / (1/3,1 + 0,49 + 3,2/2,63) = 490$ кг/м³, в том числе цемента $C = 0,8 \cdot 490 = 390$ кг/м³, золы $Z = 0,2 \cdot 490 = 100$ кг/м³.
5. Расход воды $V = (C+D) / (V/C) = 490 / 0,49 = 240$ л/м³.
Добавка воды с учетом водопотребности золы $V_d = (0,3 - 0,25) \cdot 100 = 5$ л.
Окончательные расходы $V = 240 + 5 = 245$ л/м³, $C = 390 + 5/0,49 = 400$ кг/м³.
Расход песка $P = n(C+D) = 3,2 \cdot 500 = 1600$ кг/м³.
Уточняют состав при проведении пробных замесов.

ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ

§ 13.1. ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ НА ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

● Для приготовления легких бетонов используют различные виды пористых заполнителей: искусственные — керамзит, аглопорит, перлит, шлаковую пемзу и др. — и естественные — туф, пемзу и т. д.

Легкие бетоны на пористых заполнителях применяют в ограждающих конструкциях и для снижения собственной массы несущих конструкций. Поэтому для этих бетонов наряду с прочностью очень важное значение имеет плотность бетона.

По плотности различают *особо легкие теплоизоляционные бетоны* с плотностью в высушенном состоянии менее 500 кг/м^3 и *легкие бетоны* с плотностью $500 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$. Прочность особо легких бетонов редко бывает более $1,5 \text{ МПа}$. Прочность легкого бетона может изменяться в значительных пределах — от $2,5$ до 30 МПа и выше. Обычно легкие бетоны подразделяются на *конструктивно-теплоизоляционные* с плотностью $500 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$ и прочностью $2 \dots 10 \text{ МПа}$ и *конструктивные* с плотностью $1400 \dots 1800 \text{ кг/м}^3$ и прочностью $10 \dots 30 \text{ МПа}$.

По структуре различают *плотные*, или *обычные*, легкие бетоны, в которых раствор на тяжелом или легком песке полностью заполняет межзерновые пустоты крупного заполнителя (обычно с некоторой разбивкой его зерен), *поризованные легкие бетоны*, в которых растворную часть вспучивают с помощью пено- или газообразующих добавок, и *крупнопористые легкие бетоны*, в которых не содержится песка и сохраняются межзерновые пустоты. В строительстве используют главным образом легкие бетоны с крупностью пористого заполнителя до $20 \dots 40 \text{ мм}$, однако применяют и мелкозернистые легкие бетоны.

Прочность легких бетонов, как и тяжелых, зависит от цементно-водного отношения, так как оно определяет свойства цементного камня, скрепляющего все составляющие бетона в единый монолит. Однако пористые заполнители вследствие особенностей своей структуры имеют невысокую прочность, обычно ниже прочности цементного раствора. Введение их в бетон приводит к снижению его прочности по сравнению с обычным тяжелым бетоном на прочных плотных заполнителях, причем тем в большей степени, чем больше содержание заполнителя и меньше его плотность. В результате кривые зависимости прочности легкого бетона от цементно-водного отношения располагаются ниже кривых для обычного бетона и бетоны на заполнителях разной прочности имеют различные кривые $R_6 = f(\Pi/V)$ (рис. 13.1).

Другой важной особенностью легких бетонов на пористых заполнителях является то обстоятельство, что каждый крупный за-

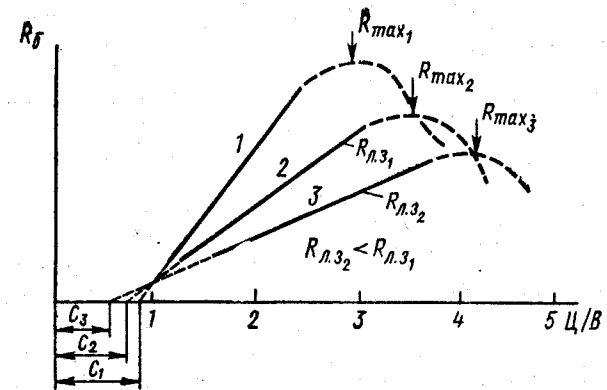


Рис. 13.1. Зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения для обычного 1 и легкого 2, 3 бетонов на пористом заполнителе

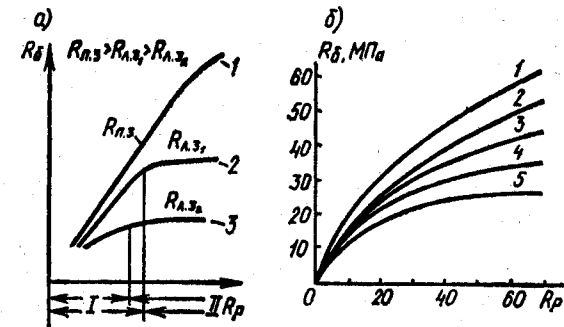


Рис. 13.2. Влияние прочности керамзитового гравия и раствора на прочность керамзитобетона:

а — обобщенная зависимость: 1 — бетон на гранитном щебне; 2, 3 — бетон на пористом заполнителе; 1 — зона возрастания прочности бетона; II — зона максимальной прочности бетона; б — результаты экспериментов; 1 — прочность керамзита 7 МПа ; 2 — то же, 5 МПа ; 3 — то же, 4 МПа ; 4 — то же, 3 МПа ; 5 — то же, 2 МПа

полнитель позволяет получать бетоны только до определенной прочности, по достижении которой дальнейшее повышение прочности раствора, например за счет уменьшения водоцементного отношения, не приводит к заметному повышению прочности бетона (рис. 13.2). Кривая зависимости $R_6 = f(R_p)$ имеет два участка. На первом участке повышение прочности раствора приводит к увеличению прочности бетона, хотя в несколько меньшей степени, чем при применении прочных плотных заполнителей. Здесь проявляется соответственно и влияние водоцементного фактора. На втором участке повышение прочности раствора не приводит

к заметному увеличению прочности бетона, так как слабый заполнитель и хрупкость тонкого цементного каркаса этому препятствуют. Дальнейшее повышение прочности раствора в этом случае экономически нецелесообразно, так как в равноподвижных бетонных смесях оно достигается за счет увеличения расхода цемента, не приводя к существенному улучшению свойств бетона. Для получения легкого бетона разных марок следует так выбирать прочность заполнителя, чтобы обеспечивать рациональное использование цемента, т. е. получать бетоны, соответствующие первому участку кривой $R_b = f(R_p)$. Лишь в случае предъявления к бетону особых требований по плотности рационально применение бетонов, соответствующих второму участку этой кривой.

Существенное влияние на прочность легких бетонов оказывает содержание в нем крупного пористого заполнителя или концентрация заполнителя, обычно указываемая как относительная величина (объем легкого заполнителя, содержащийся в 1 м^3 бетона). Влияние концентрации заполнителя зависит от соотношения его прочности и прочности раствора. Обычно при достаточно высокой прочности раствора в конструктивных легких бетонах увеличение концентрации заполнителя приводит к уменьшению прочности бетона. При малой разнице в прочности раствора и бетона, например в конструктивно-теплоизоляционных легких бетонах, максимальная прочность достигается при определенной оптимальной концентрации заполнителя (рис. 13.3).

При определении состава легкого бетона на пористых заполнителях приходится учитывать все три особенности влияния заполнителя на прочность бетона. Поэтому расчет проводят не на основе какой либо единой формулы или графика, а на основе данных ряда таблиц и поправочных коэффициентов, составленных с учетом этих особенностей.

Введение пористого заполнителя изменяет и деформативные свойства бетона. Уменьшается модуль упругости бетона, причем тем в большей степени, чем деформативнее заполнитель и выше его содержание (см. гл. 6). Важным свойством легкого бетона является его теплопроводность, которая определяет толщину ограждающих конструкций. Коэффициент теплопроводности легкого бетона возрастает с увеличением его плотности (рис. 13.4).

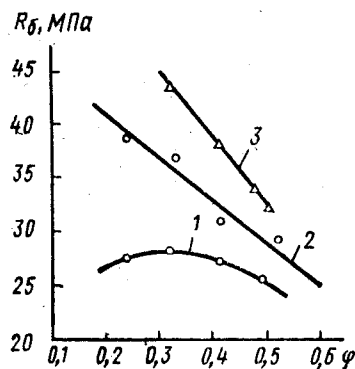


Рис. 13.3. Влияние концентрации легкого заполнителя ϕ на прочность бетона R_b :
1 — $R_p/R_{к.ц} = 5,7$; 2 — $R_p/R_{к.ц} = 7,5$; 3 — $R_p/R_{к.ц} = 10,6$ ($R_{к.ц}$ — прочность керамики в цилиндре)

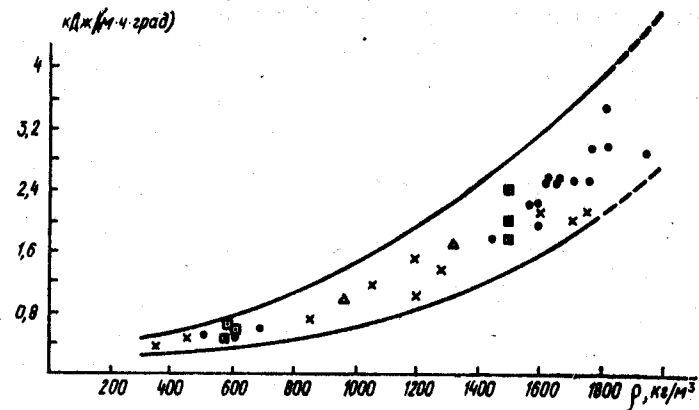


Рис. 13.4. Зависимость коэффициента теплопроводности λ легкого бетона на пористом заполнителе от плотности ρ бетона

Увеличение содержания легкого заполнителя, уменьшение его плотности приводят к понижению коэффициента теплопроводности легкого бетона, т. е. улучшает его теплофизические свойства. Однако при этом уменьшается и прочность бетона. Поэтому на практике приходится искать такое оптимальное соотношение в свойствах исходных материалов и бетона и так выбирать состав бетона, чтобы его необходимые свойства достигались наилучшим образом при минимально возможном в заданных условиях расходе цемента.

Пористые заполнители обладают значительным водопоглощением и при введении их в смесь отсасывают из цементного раствора часть воды. Наиболее интенсивно этот процесс происходит в первые 10...15 мин после приготовления бетонной смеси, причем количество воды, отсасываемое заполнителем, зависит от состава бетонной смеси: оно увеличивается в литых и подвижных смесях при высоких значениях водоцементного отношения и уменьшается в жестких бетонных смесях при низких значениях водоцементного отношения. Обычно величина водопоглощения пористого заполнителя в бетонной смеси на 30...50% ниже его водопоглощения в воде, так как на первое оказывает влияние водоудерживающая способность цементного теста.

Чтобы компенсировать влияние водопоглощения пористого заполнителя и сохранить подвижность бетонной смеси, приходится увеличивать расход воды (рис. 13.5). Степень повышения водопотребности бетонной смеси будет зависеть от расхода легкого заполнителя и его водопотребности (см. гл. 2): чем выше водопотребность заполнителя, тем больше расход воды для получения определенной подвижности бетонной смеси. Водопоглощение пористого заполнителя существенно влияет на водоудерживающую

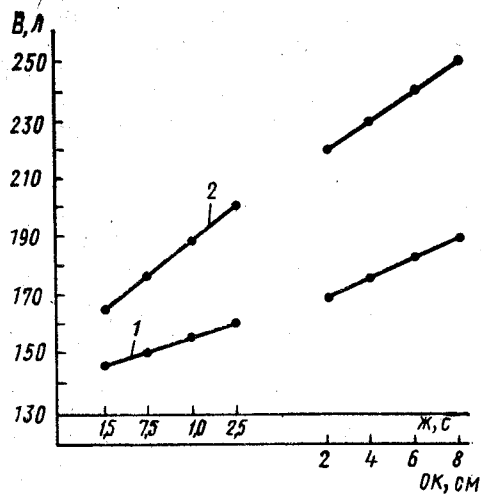


Рис. 13.5. Водопотребность В бетонной смеси на гравии 1 и керамзите 2 с одинаковой предельной крупностью 20 мм

ссывая влагу, способствуют получению более плотного и прочного контактного слоя цементного камня. На втором этапе, при уменьшении количества воды в цементном камне вследствие гидратации цемента, пористые заполнители возвращают ранее поглощенную воду, создавая благоприятные условия для протекания гидратации цемента и уменьшая усадочные явления в цементном камне. Высокая шероховатость поверхности легких заполнителей обеспечивает хорошее сцепление между цементным камнем и заполнителем, а значительная деформативность заполнителя способствует уменьшению отрицательного влияния на структуру бетона усадки цементного камня, предотвращает появление усадочных микротрещин.

В результате в легких бетонах на пористых заполнителях цементный камень может обладать достаточной плотностью и однородностью, что существенно уменьшает его проницаемость, повышая тем самым долговечность бетонных и железобетонных конструкций и их стойкость в некоторых агрессивных средах (см. гл. 8).

Пористый щебень и песок состоят из зерен неправильной формы с сильно развитой поверхностью и обладает вследствие этого увеличенным объемом межзерновых пустот. Для заполнения этих пустот и создания достаточной смазки между зернами заполнителя с целью получения нерасслаиваемых и удобообрабатываемых бетонных смесей требуется в 1,5...2 раза больше це-

ментного теста, чем при применении плотных тяжелых заполнителей.

способность бетонной смеси, уменьшая склонность к расслаиванию у литых и подвижных смесей и позволяя применять смеси с высоким водоцементным отношением. Это имеет большое значение для получения конструктивно-теплоизоляционных легких бетонов. Вместе с тем легкобетонные смеси жесткой консистенции склонны к расслаиванию при вибрировании.

Пористые заполнители вследствие своей способности к влагообмену с цементным тестом в большей мере, чем обычные плотные заполнители, влияют на процессы его структурообразования. На первом этапе пористые заполнители, отса-

ссывая влагу, способствуют получению более плотного и прочного контактного слоя цементного камня.

При применении заполнителей высокой пористости, но с уменьшенным водопоглощением вследствие придания материалу особой структуры или специальной обработки поверхности заполнителя гидрофобизаторами или веществами, создающими на ней малопроницаемую пленку или тонкий внутренний слой, позволяет уменьшить водопотребность бетонной смеси, сократить расход цемента, повысить прочность и улучшить другие свойства бетона на пористых заполнителях. Однако такие мероприятия обычно повышают стоимость бетона и целесообразность их применения должна определяться технико-экономическим расчетом. Влияние пористого заполнителя на технологические свойства бетонной смеси и особенности твердения бетона учитывают при проектировании состава легкого бетона и при производстве конструкций.

■ Состав бетона на пористых заполнителях определяется расчетно-экспериментальным путем. Вначале находят предварительный состав бетона, который затем уточняют на пробных замесах. При определении предварительного состава бетона используют зависимости и учитывают особенности влияния на свойства бетона и бетонной смеси различных видов пористого заполнителя.

В отличие от обычного бетона при проектировании состава легкого бетона необходимо наряду с прочностью бетона и удобоукладываемостью бетонной смеси обеспечить заданную его плотность. Поскольку плотность зависит от свойств и содержания пористого заполнителя, расходы мелкого и крупного заполнителей определяют из условия заданной плотности бетона.

Для получения составов легкого бетона при минимальных расходах цемента необходимо правильно выбрать материалы для бетона. Рекомендуется назначать марку цемента в зависимости от требуемой прочности бетона в соответствии с табл. 13.1. Прочность на сжатие крупного заполнителя должна быть не менее значений, указанных в табл. 13.2, а насыпная плотность крупного заполнителя — не менее значений, указанных в табл. 13.3. Между фракциями крупного заполнителя принимают следующие соотношения: для фракций (5...10):(10...20) мм — 40:60%, для фракций (5...10):(10...20):(20...40) мм — 20:30:50%.

Средняя прочность крупного заполнителя, определяемая сдавливанием порции заполнителя в стальном цилиндре диаметром 120 мм,

$$R_k = 0,01 (R_{k1}x_1 + R_{k2}x_2 + R_{k3}x_3),$$

где R_{k1} , R_{k2} , R_{k3} — прочность каждой фракции заполнителя; x_1 , x_2 , x_3 — содержание каждой фракции в смеси, % по массе.

Мелкие пористые пески, применяемые в легких бетонах прочностью 15...50 МПа, должны иметь модуль крупности 1,8...2,5 и насыпную плотность не менее 600 кг/м³. Для бетона прочностью

Таблица 13.1. Марки цемента, принимаемые для легких бетонов

Марка цемента	Требуемая прочность легкого бетона, МПа						
	15	20	25	30	35	40	50
Рекомендуемая	400	400	400	500	500	500	600
Допускаемая	300	300	300	400	400	400	500
»	500	600	500, 600	600	600	600	—

Таблица 13.2. Минимальная прочность крупных пористых заполнителей в зависимости от требуемой прочности бетона

Заданная прочность бетона на сжатие, МПа	Марка крупного заполнителя по прочности на сжатие	Прочность на сжатие при сдавливании в цилиндре, МПа		
		пористого гравия	пористого щебня (за исключением аглопоритового щебня)	аглопоритового щебня
15	75	1,5	1	0,6
20	100	2,0	1,2	0,7
25	125	2,5	1,5	0,8
30	150	3,5	1,8	1,0
35	200	4,5	2,2	1,2
40	250	5,5	2,7	1,4
50	300	6,5	3,3	1,6

Таблица 13.3. Максимальная насыпная плотность крупного заполнителя в зависимости от заданной плотности бетона

Заполнитель	Плотность бетона в высушенном состоянии, кг/м³						
	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Пористый гравий	—/500	—/600	—/700	600/800	700/900	800/—	900/—
Пористый щебень	—	—/500	—/600	500/700	600/800	700/900	800/1000

Примечание. В числителе — насыпная плотность крупного пористого заполнителя при использовании плотного песка (кварцевого и т. п.), в знаменателе — то же, при использовании пористого песка, полученного в процессе дробления крупного заполнителя или отсева от него мелкой фракции.

15 МПа допускается применение вспученного перлитового песка с насыпной плотностью более 200 кг/м³. Содержание в песке зерен размером менее 0,14 мм должно быть не более 10% по объему. Для бетонов прочностью 15...20 МПа, когда активность цемента больше рекомендуемой, можно применять до 25% песка с содержанием зерен размером менее 0,14 мм.

Так как прочность легкого бетона зависит не только от активности цемента и Ц/В, но также от свойств и содержания заполнителя и подвижности бетонной смеси, то при определении рас-

Таблица 13.4. Ориентировочный расход цемента (кг) для расчета состава бетонов на пористых заполнителях с предельной крупностью 20 мм и плотном песке с жесткостью бетонной смеси 5...8 с

Прочность бетона, МПа	Рекомендуемая марка цемента	Марка пористого заполнителя по прочности зерна						
		75	100	125	150	200	250	300
15	400	300	280	260	240	230	220	210
20	400	—	340	320	300	230	260	250
25	400	—	—	390	260	330	310	290
30	500	—	—	—	420	390	360	330
35	500	—	—	—	—	450	410	380
40	500	—	—	—	—	—	480	450
50	600	—	—	—	—	—	570	540

Таблица 13.5. Коэффициенты изменения расхода цемента при изменении его марки, вида песка, предельной крупности заполнителя и подвижности бетонной смеси

Характеристика материалов	Прочность бетона, МПа						
	15	20	25	30	35	40	50
Цемент марки:							
300	1,15	1,2	—	—	—	—	—
400	1	1	1	1,5	1,2	1,25	—
500	0,9	0,88	0,85	1	1	1,1	1,1
600	—	—	0,88	0,9	0,88	0,85	1
Песок:							
плотный	1	1	1	1	1	1	1
пористый	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Наибольшая крупность за- полнителя, мм:							
40	0,9	0,9	0,93	0,93	0,95	0,95	0,95
20	1	1	1	1	1	1	1
10	1,1	1,1	1,07	1,0	1,05	1,05	1,05
Жесткость, с:							
5...8	1	1	1	1	1	1	1
8...12	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
12...20	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Осадка конуса, см:							
1...2	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
2...5	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
8...12	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

хода цемента используют данные, полученные опытным путем (табл. 13.4, 13.5). Вначале по табл. 13.4 назначают расход цемента в зависимости от заданной прочности бетона, а затем по табл. 13.5 его уточняют в зависимости от свойств используемых материалов и подвижности бетонной смеси.

Расход воды назначают с учетом требуемой жесткости бетонной смеси и вида крупного заполнителя (табл. 13.6). При этом предполагается, что в качестве мелкого заполнителя используют

Таблица 13.6. Ориентировочный начальный расход воды (л/м³) для приготовления бетонной смеси с использованием плотного песка и природного крупного заполнителя

Осадка конуса, см	Жесткость, с	Предельная крупность, мм					
		гравия			щебня		
		10	20	40	10	20	40
8...12	—	235	220	205	265	250	235
3...7	—	220	205	190	245	230	215
1...2	3...5	205	190	175	225	210	195
—	5...8	195	180	165	215	200	185
—	8...12	185	170	160	200	185	175
—	12...20	175	160	150	190	175	165

плотный песок. Для повышения точности определения расхода воды в значения, взятые по табл. 13.6, вводят ряд поправок, которые учитывают влияние на расход воды других факторов. В первую очередь следует учитывать водопотребность мелкого заполнителя, от свойств и расхода которого существенно изменяется водопотребность бетонной смеси. Для того чтобы при изменении плотности песка получить сопоставимые результаты, состав стандартного раствора в отличие от состава, используемого при определении водопотребности плотных песков, назначают не по массе, а по абсолютному объему и принимают равным 1:2,28, что ориентировочно соответствует для кварцевого песка отношению по массе 1:2. Водопотребность (%) пористого песка

$$B = \frac{(B/C - НГ) \cdot 100}{2,28}, \quad (13.1)$$

где НГ — нормальная густота цемента.

Водопотребность пористых песков в 2...3 раза больше, чем плотных песков, например водопотребность дробленого керамзитового песка 13...16%, шлакопемзового песка 16...18%. При среднем расходе песка 250 л/м³ по абсолютному объему изменение водопотребности песка на 1% будет соответствовать изменению расхода воды 0,02 л/л абсолютного объема песка.

Среднюю водопотребность плотного песка принимают равной 7%. При применении песков с другой водопотребностью в расход воды следует вводить поправку

$$B_1 = 0,02 \frac{\Pi}{\rho_{с.п}} (B - 7). \quad (13.2)$$

На водопотребность легбетонной смеси влияют также расход цемента и объемная концентрация крупного заполнителя. Как и в обычном тяжелом бетоне, в конструктивном керамзитобетоне водопотребность бетонной смеси возрастает при высоких

расходах цемента (низких значениях В/Ц). Ориентировочно можно считать, что при расходе цемента выше 450 кг/м³ водопотребность возрастает приблизительно на 0,15 л/м³ на каждый 1 кг/м³ расхода цемента сверх критического значения. Отсюда поправка к расходу воды при высоких расходах цемента

$$B_2 = 0,15(C - 450). \quad (13.3)$$

Для конструктивного керамзитобетона минимальная водопотребность бетонной смеси достигается при объемной концентрации керамзита 0,35...0,4. При большей или меньшей объемной концентрации крупного заполнителя в расход воды вводят поправку

$$B_3 = 2000(\varphi - 0,37)^2, \quad (13.4)$$

где $\varphi = K/\rho'_{к.з}$ — объемная концентрация крупного заполнителя.

Для определения общей водопотребности бетонной смеси указанные поправки следует прибавлять к начальному расходу воды B_0 , принимаемому по табл. 13.6 в зависимости от подвижности бетонной смеси, предельной крупности и вида заполнителя (гравия, щебня):

$$B = B_0 + B_1 + B_2 + B_3. \quad (13.5)$$

После определения расходов цемента и воды, соответствующих требуемой прочности бетона и подвижности бетонной смеси, расходы крупного $Z_{кр}$ и мелкого Π заполнителей могут быть найдены из решения системы уравнений:

$$\rho_б = 1,15C + \Pi + K; \quad (13.6)$$

$$\frac{C}{\rho_{ц}} + \frac{\Pi}{\rho_{п}} + \frac{Z_{кр}}{\rho'_{з.кр}} + B = 1000, \quad (13.7)$$

где $\rho_б$ — плотность бетона в сухом состоянии, кг/м³; $\rho_{п}$, $\rho'_{з.кр}$ — плотность зерен мелкого и крупного пористых заполнителей в цементном тесте, кг/л (для плотного песка $\rho'_{п} = \rho_{п}$); C , Π , $Z_{кр}$ и B — расходы цемента, песка, крупного заполнителя и воды на 1 м² бетона.

После подстановки выражения (13.5) в (13.7) можно решить систему уравнений (13.6), (13.7) и найти расходы крупного и мелкого заполнителей. Так как подобные расчеты довольно трудоемки, то на практике используют таблицы объемной концентрации крупного заполнителя в зависимости от заданной плотности бетона, плотности зерен крупного заполнителя, начального расхода воды, расхода цемента и водопотребности песка (табл. 13.7, 13.8), заранее рассчитанные на ЭВМ по уравнениям (13.6) и (13.7). Для получения одного и того же значения плотности бетона даже при неизменной плотности зерен крупного заполнителя его концентрация φ может изменяться в 1,5...2 раза в зависимости от расходов цемента, воды и водопотребности песка.

Таблица 13.7. Объемная концентрация ϕ крупного заполнителя для легких бетонов на плотном песке

Плотность бетона, кг/м ³	Плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте, кг/дм ³	Родопотребность песка, %								
		6			8			10		
		Расход воды, л								
160	240	240	160	200	240	160	200	240		
1500	1	0,47	0,43	0,38	0,46	0,41	0,35	0,45	0,4	0,32
	1,2	0,5	0,46	0,42	0,5	0,45	0,4	0,48	0,44	0,38
	1,4	—	0,5	0,46	—	0,49	0,45	—	0,48	0,43
1600	1	0,43	0,38	0,32	0,42	0,35	0,25	0,39	0,32	—
	1,2	0,47	0,42	0,35	0,46	0,4	0,3	0,44	0,38	0,27
	1,4	0,5	0,46	0,41	0,5	0,45	0,39	0,48	0,43	0,36
	1,6	0,54	0,5	0,45	0,53	0,49	0,44	0,53	0,48	0,43
1700	1	0,39	0,31	—	0,36	0,26	—	0,32	—	—
	1,2	0,43	0,38	0,27	0,41	0,33	—	0,38	0,28	—
	1,4	0,47	0,41	0,33	0,45	0,39	0,3	0,43	0,36	0,29
	1,6	0,5	0,46	0,4	0,49	0,44	0,37	0,48	0,42	0,31
	1,8	0,54	0,5	0,45	0,53	0,49	0,43	0,53	0,8	0,41
1800	1,2	0,37	0,2	—	0,33	—	—	—	—	—
	1,4	0,42	0,34	0,25	0,39	—	—	0,36	—	—
	1,6	0,45	0,4	0,26	0,49	0,37	0,25	0,42	0,3	—
	1,8	0,51	0,45	0,38	0,49	0,44	0,3	0,48	0,41	0,27
	2	—	0,5	0,44	—	0,49	0,42	—	0,48	0,44

Примечание. Значения ϕ даны при расходе цемента 300 кг/м³, при большем расходе цемента значения ϕ возрастают приблизительно на 0,01 на каждые 100 кг/м³ цемента, при уменьшении расхода цемента значения ϕ соответственно сокращаются.

Таблица 13.8. Оптимальная объемная концентрация крупного заполнителя

Межзерновая пустотность	Оптимальная объемная концентрация при			Межзерновая пустотность	Оптимальная объемная концентрация при		
	жесткости выше 10 с	осадке конуса 1...3 см или жесткости 3...10 с	осадке конуса выше 3 см		жесткости выше 10 с	осадке конуса 1...3 см или жесткости 3...10 с	осадка конуса выше 3 см
0,36	0,52	0,49	0,47	0,46	0,42	0,39	0,37
0,38	0,50	0,47	0,45	0,48	0,4	0,37	0,35
0,4	0,48	0,45	0,43	0,5	0,38	0,35	0,38
0,42	0,46	0,43	0,41	0,52	0,36	0,33	0,31
0,44	0,44	0,41	0,39	0,54	0,34	0,31	0,29

Так как для обеспечения заданной плотности бетона приходится в ряде случаев использовать составы с неоптимальной (с точки зрения удобоукладываемости смеси) объемной концентрацией крупного заполнителя, то для того, чтобы притом не получить смесь, склонную к расслаиванию, значения ϕ должны отличаться

не менее чем на 0,25 и не более чем на 0,05 от оптимальных значений, приведенных в табл. 13.8.

Расход крупного заполнителя

$$Z_{кр} = 1000\phi'_{з.кр}, \quad (13.8)$$

где $\phi'_{з.кр}$ — плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте, кг/л.

Плотность зерен крупного заполнителя в цементном тесте ориентировочно можно находить, умножая плотность зерен крупного заполнителя на коэффициент, равный 1,05 для пористого гравия и 1,1 для пористого щебня.

Расход плотного песка устанавливают в зависимости от плотности бетона и расходов цемента и крупного заполнителя:

$$P = \rho'_6 - 1,15Ц - Z_{кр}. \quad (13.9)$$

Плотность бетона можно регулировать, вводя в бетон пористые пески и изменяя соотношения между плотным и пористым песком, что позволяет обеспечить оптимальную объемную концентрацию крупного заполнителя. Для определения расхода пористого $P_{пор}$ и плотного $P_{пл}$ песков при выбранных значениях расхода цемента, начального расхода воды, объемной концентрации крупного заполнителя необходимо решить систему уравнений:

$$P_{пл}/\rho_{пл.л} + P_{пор}/\rho'_{пор.п} + B = 1000(1 - \phi) + Ц/\rho_{ц}; \quad (13.10)$$

$$P_{пл} + P_{пор} = \rho'_6 - 1,15Ц - 1000\phi'_{з.кр}. \quad (13.11)$$

Если ввести условные обозначения

$$A = 1000(1 - \phi) - Ц/\rho_{ц} - (B_0 + B_2 + B_3); \quad (13.12)$$

$$Q = \rho'_6 - 1,15Ц - 1000\phi'_{з.кр}; \quad (13.13)$$

$$C_{в.пл} = [1 + 0,02(B_{пл}^{пл} - 7)]/\rho_{пл.л}; \quad (13.14)$$

$$C_{в.пор} = [1 + 0,02(B_{пл}^{пор} - 7)]/\rho'_{з.п}; \quad (13.15)$$

то

$$P_{пор} = (A - QC_{в.пл}) / (C_{в.пор} - C_{в.пл}); \quad (13.16)$$

$$P_{пл} = Q - P_{пор}. \quad (13.17)$$

Состав легких бетонов на плотном песке для пробных замесов устанавливают в следующем порядке:

1. Определяют расход цемента в зависимости от заданной прочности бетона, активности цемента и прочности крупного заполнителя (табл. 13.4, 13.5).

2. Устанавливают начальный расход воды в зависимости от заданной жесткости или подвижности бетонной смеси, наибольшей крупности и вида крупного заполнителя (табл. 13.6).

3. Определяют объемную концентрацию крупного заполнителя в зависимости от расхода цемента и воды, заданной плотности зерен крупного заполнителя и водопотребности песка (табл. 13.7). Если исходные данные находятся между значениями, указанными в табл. 13.7, то объемную концентрацию выбирают по интерполяции. Если объемная концентрация крупного заполнителя превышает более чем на 0,05 оптимальное значение, указанное в табл. 13.8, то следует применить более легкие заполнители или поризацию бетона.

4. Определяют расход крупного заполнителя по формуле (13.8).

5. Определяют расход песка по формуле (13.9).

6. Определяют расход воды по формуле (13.5).

■ Первоначальный состав легких бетонов на пористом или смешанном песке устанавливают в следующем порядке:

1. Определяют расход цемента по табл. 13.4 и 13.5.

2. Устанавливают начальный расход воды с учетом водопотребности пористого песка по табл. 13.6.

3. Определяют объемную концентрацию крупного заполнителя по табл. 13.8.

4. Устанавливают расход крупного заполнителя по формуле (13.8).

5. Определяют расход пористого песка, обеспечивающий получение заданной плотности бетона в сухом состоянии по формуле (13.16) с использованием значений A , Q , $C_{в.пл}$, $C_{в.пор}$ по формулам (13.12) ... (13.15) с учетом, что $Z_{кр} = 1000\varphi'_{з.кр}$.

6. Определяют расход плотного песка по формуле (13.17). Если окажется, что расход пористого или плотного песка менее 20 кг/см^3 , то бетон следует готовить только на песке, расход которого наибольший.

7. Подсчитывают общий расход воды:

$$V = V_0 + V_{п.пл} + V_{п.пор} + V_2 + V_3,$$

где $V_{п.пор}$ — поправка на водопотребность пористого песка:

$$V_{п.пор} = 0,02 \frac{P_{пор}}{r_{з.пор}} (V_п - 7).$$

Для опытных замесов помимо предварительного состава рассчитывают еще два состава, в которых расход цемента принимают на 10...20% меньше и больше, чем полученный в исходном составе. Если на принятых материалах нельзя получить заданную плотность бетона при допустимых значениях φ , то диапазон варьирования расхода цемента следует уменьшить так, чтобы объемная концентрация крупного заполнителя оказалась в допустимых пределах, или принять другие заполнители.

Таблица 13.9. Характеристика керамзитового гравия

Наименование	Фракция, мм		Смесь заполнителя
	5...10	10...20	
Объемная насыпная плотность, кг/м^3	570	650	680
Плотность зерен в цементном тесте, кг/л	1,25	1,19	1,22
Пустотность	0,46	0,45	0,41
Прочность в цилиндре, МПа	5,9	5,1	5,5

По результатам опытной проверки строят график $R_6 = f(R_{ц})$, по которому принимают действительное значение расхода цемента и затем уточняют расходы других материалов.

Пример 13.1. Подобрать состав керамзитобетона с заданной прочностью 25 МПа, плотностью в сухом состоянии 1700 кг/м^3 при подвижности бетонной смеси по осадке конуса 3...7 см. Материалы: цемент М500, песок плотный с истинной плотностью $2,65 \text{ кг/л}$ и водопотребностью 6,5% керамзитовый гравий с указанными в табл. 13.9 свойствами.

Отношение фракций керамзита 5...10 и 10...20 мм принимают 40:60% (по массе). Средняя плотность зерен керамзита в цементном тесте

$$r'_{з.кр} = 100 / (40 / 1,25 + 60 / 1,19) = 1,22.$$

Средняя прочность керамзита в цилиндре $R_к = 0,01(5,9 \cdot 40 + 5,1 \cdot 60) = 5,5 \text{ МПа}$.

По своим свойствам керамзитовый гравий удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалу для получения заданных свойств бетона.

По табл. 13.4 расход цемента составляет 310 кг/м^3 . Поправочные коэффициенты (см. табл. 13.5) на цемент М500 равны 0,85 и при осадке конуса 3...7 см — 1,15.

Окончательный расход цемента $310 \cdot 0,85 \cdot 1,15 = 305 \text{ кг/м}^3$.

По табл. 13.6, начальный расход воды $V_0 = 190 \text{ л/м}^3$.

Интерполируя, по табл. 13.7 находят объемную концентрацию керамзита: $\varphi = 0,38$. Это значение меньше указанного в табл. 13.8 ($\varphi = 0,4$ при пустотности керамзита 0,43 и осадке конуса бетонной смеси 3 см) и, следовательно, допустимо.

Расход керамзита $K = 1000 \cdot 0,38 \cdot 1,22 = 465 \text{ кг/м}^3$.

Расход песка $P = 1700 - 1,15 \cdot 305 - 465 = 886 \text{ кг/м}^3$.

Общий расход воды $V = 190 + 2000(0,38 - 0,37)^2 + 0,01 \cdot 885(6,5 - 7) = 186 \text{ л/м}^3$.

Пример 13.2. Подобрать состав керамзитобетона с заданной прочностью 15 МПа, плотность в сухом состоянии 1600 кг/м^3 при жесткости бетонной смеси 30...50 с. Материалы: цемент М400, песок плотный с истинной плотностью $2,65 \text{ кг/л}$ и водопотребностью 6%, песок керамзитовый с плотностью зерен в цементном тесте $1,8 \text{ кг/л}$ и водопотребностью 14%, щебень керамзитовый фракции 5...10 мм, плотностью 880 кг/м^3 , плотностью зерен в цементном тесте $1,75 \text{ кг/л}$, пустотностью 0,5, прочностью в цилиндре 1,5 МПа.

По табл. 13.4 расход цемента равен 260 кг/м^3 .

По табл. 13.5, поправочные коэффициенты: на пористый (смешанный) песок — 1,1; на меньшую крупность щебня — 1,1; на жесткость смеси — 0,9. Окончательно расход цемента $C = 260 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 0,9 = 283 \text{ кг/м}^3$.

Начальный расход воды по табл. 13.6 составит $V = 200 \text{ л/м}^3$. Объемная концентрация щебня, по табл. 13.8, $\varphi = 0,38$. Расход крупного заполнителя $Z_{кр} = 1000 \cdot 0,38 \cdot 1,75 = 665 \text{ кг/м}^3$.

Определяют расход пористого песка:

$$V_1=0; V_2=0; A=1000(1-0,38)-283/3,1-200=329 \text{ кг/м}^3;$$

$$Q=1600-1,15 \cdot 283-665=611 \text{ кг/м}^3;$$

$$C_{в.пл}=[1+0,02(6-7)]/2,65=0,37;$$

$$C_{в.пор}=[1+0,02(14-7)]/1,8=0,63;$$

$$P_{пор}=(329-611 \cdot 0,73)/(0,63-0,37)=390 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Расход плотного песка } P_{пл}=611-390=221 \text{ кг/м}^3.$$

Определяем общий расход воды:

$$V_{з.пл}=0,01 \cdot 221(6-7)=-2,2 \text{ л/м}^3;$$

$$V_{з.пор}=(0,02 \cdot 390/1,8)(14-7)=30,3 \text{ л/м}^3;$$

$$V=200-2,2+30,3=228 \text{ л/м}^3.$$

Корректировка состава легкого бетона на пористых заполнителях по результатам опытной проверки и определение расхода материалов на замес бетоносмесителя выполняются тем же порядком, как для обычного тяжелого бетона.

§ 13.2. ПОРИЗОВАННЫЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН

● Для улучшения теплофизических свойств легкого бетона на пористом заполнителе применяют поризацию растворной части бетона или заменяют ее поризованным цементным камнем, т. е. готовят легкий бетон на крупном пористом заполнителе без песка. К поризованным легким бетонам относят бетоны, содержащие более 800 л/м³ легкого крупного заполнителя, у которых объем воздушных пор составляет 5...25%. Поризацию таких бетонов осуществляют либо предварительно приготовленной пеной, либо за счет введения газообразующих или воздухововлекающих добавок. пеной поризуют только беспесчаные смеси, воздухововлекающими добавками — только смеси с песком, газообразующими добавками — смеси с песком и без песка. В зависимости от используемого заполнителя и способа поризации бетоны получают название: керамзитопенобетон, керамзитогазобетон, керамзитобетон с воздухововлекающей добавкой.

По сравнению с легким бетоном плотной структуры поризованный бетон имеет пониженную плотность и коэффициент теплопроводности. В нем можно использовать крупный заполнитель прерывного зернового состава, уменьшить или полностью исключить расход пористого песка, применить более тяжелый пористый заполнитель (без увеличения плотности бетона).

По сравнению с неавтоклавным ячеистым бетоном поризованный легкий бетон отличается значительно меньшим расходом вяжущего вещества, повышенным модулем деформации и долговечностью, меньшей усадкой. Поризованные легкобетонные смеси отличаются хорошей связанностью и удобоукладываемостью, и их применение значительно упрощает формование изделий, позволя-

Таблица 13.10. Плотность керамзитобетона, поризованного воздухововлекающими добавками

Плотность керамзита, кг/м ³	Плотность керамзитобетона, кг/м ³ , при его прочности, МПа					
	50		75		100	
	на песке					
	керамзитовом	кварцевом	керамзитовом	кварцевом	керамзитовом	кварцевом
300	800	900	900	950	—	—
400	850	950	950	1000	1000	1100
500	900	1000	1000	1050	1050	1050
600	1000	1100	1050	1150	1100	1200
700	1100	1200	1150	1250	1200	1300

ет отказаться от пригруза при уплотнении смеси в процессе ее укладки вибрированием.

Прочность поризованного бетона может быть 5...10 МПа, а плотность — 700...1400 кг/м³. Прочность и плотность бетона зависят от его структуры. Как правило, обжиговые пористые материалы (керамзит и др.) при одной и той же плотности имеют более высокую прочность, чем пористый раствор. Поэтому максимальное насыщение поризованного легкого бетона керамзитом (0,9...1,15 м³/м³) способствует повышению его прочности или снижению расхода цемента.

Для поризованного легкого бетона рационально применять цемент М400 и выше, так как это способствует уменьшению его расхода и тем самым понижению плотности бетона (цемент — наиболее тяжелая составляющая бетона). Выбор марки керамзита по плотности и виду песка можно ориентировочно сделать на основе табл. 13.10, в которой показана зависимость плотности керамзитобетона от вида керамзита, песка и требуемой прочности бетона: чем выше требуемая прочность, тем больше расход цемента и соответственно выше плотность керамзитобетона.

■ Подбор состава легкого бетона, поризованного воздухововлекающими добавками, производят расчетно-экспериментальным путем с проведением опытных замесов. Расход цемента для опытных замесов определяют по табл. 13.11, а ориентировочный рас-

Таблица 13.11. Расход цемента для опытных замесов при подборе состава керамзитобетона с воздухововлекающими добавками

№ замеса	Расход цемента, кг/м ³ , для бетона прочностью, МПа		
	5	7,5	10
1	180	200	200
2	220	240	260
3	260	280	320

Таблица 13.12. Ориентировочный расход воды для керамзитобетона с воздухововлекающими добавками

Осадка конуса, см	Жесткость, с	Расход воды, л/м³, при применении песка	
		дробленого керамзитового	кварцевого
6...8	—	230...250	200...220
2...4	—	210...230	190...170
1...2	2...4	200...220	170...190
—	4...8	190...210	160...180
—	8...12	180...200	150...170

ход воды — по табл. 13.12. При использовании более легкого и пористого керамзита принимают повышенный расход воды.

Расход керамзитового гравия для подвижных смесей с учетом раздвижки его зерен для обеспечения необходимой подвижности бетонной смеси принимают 0,9...0,95 м³/м³, для малоподвижных и умеренно жестких смесей на керамзитовом песке — 0,9...1,05 м³/м³, для жестких смесей на кварцевом песке — 1,05...1,15 м³/м³ (большие значения относятся к керамзитовому гравью меньшей прочности).

Расход песка в зависимости от заданной плотности бетона

$$\Pi = \rho'_{\text{б.сух}} - 1,15Ц - К. \quad (13.18)$$

Ориентировочное значение объема вовлеченного воздуха для получения поризованного бетона слитной структуры

$$V_{\text{в.в}} = \frac{1}{10} \left[1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{\Pi}{\rho_{\text{п}}} + \frac{К}{\rho_{\text{к}}} + В \right) \right]. \quad (13.19)$$

В зависимости от необходимого объема вовлеченного воздуха определяют по табл. 13.13 ориентировочный расход воздухововлекающей добавки.

Таблица 13.13. Ориентировочный расход воздухововлекающих добавок для приготовления поризованных легких бетонов, % от массы цемента

Микропенообразователь	Требуемый объем вовлеченного воздуха, %	Песок		
		дробленый керамзитовый	кварцевый	шлаковый
ЦНИИПС-1 или СНВ	4...8	0,02...0,1	0,04...0,15	0,05...0,15
	8...12	0,05...0,15	0,1...0,2	—
ПО-6	4...8	0,3...1	0,5...1,5	1...2
	8...12	0,5...1,5	1...2,5	—

Так как на свойства поризованного керамзитобетона весьма влияют различные технологические факторы, то на производстве для получения надежных результатов при возможных колебаниях этих факторов целесообразно при подборе состава бетона принимать расчетную плотность на 2...5% ниже с прочностью на 10...20% выше, чем требуется по проекту.

Рассчитав составы бетона для трех опытных замесов, проводят их изготовление и испытания опытных образцов. При приготовлении замесов корректируют расход воды в соответствии с заданной подвижностью. По результатам испытания образцов строят графики зависимости прочности и плотности легкого бетона при заданных расходах цемента от расхода добавки и устанавливают оптимальный состав бетона. Этот состав проверяют в производственных условиях, вводя поправки на расход керамзита (с учетом его частичного раздробления в смесителе).

Пример 13.3. Подобрать состав керамзитобетона с прочностью 5 МПа, плотностью 1000 кг/м³ и подвижностью бетонной смеси 4...8 с. Материалы: порландцемент М 400, керамзитовый гравий фракции 5...20 мм, плотностью 450 кг/м³, воздухововлекающая добавка СНВ.

1. В соответствии с табл. 13.10 керамзитобетон может быть изготовлен на кварцевом песке ($M_{\text{кр}}=2,65$).

2. По табл. 13.11 для пробных замесов принимают три расхода цемента: 180, 220 и 260 кг/м³.

3. Расход керамзита $K=450 \cdot 1,1=495$ кг/м³.

4. Расход песка $\Pi_1=970-1,15 \cdot 180-495=268$ кг/м³, соответственно $\Pi_2=222$ кг/м³; $\Pi_3=176$ кг/м³.

5. По табл. 13.19, расход воды 170 л/м³.

6. Требуемый объем вовлеченного воздуха

$$V_{\text{в.в}} = (1/10) [1000 - (180/3,1 + 495/0,88 + 268/2,65) + 170] = 10,9\%.$$

соответственно $V_{\text{в.в.2}}=11,4$, $V_{\text{в.в.3}}=11,8$ %.

7. По табл. 13.13 принимают три расхода добавки СНВ: 0,1; 0,15; 0,2% от массы цемента.

Делают пробные замесы. По результатам опытов устанавливают зависимость $R_{\text{с}}=f(Ц)$, $\rho'_{\text{б.сух}}=f(Ц)$ и затем $R_{\text{с}}=f(\rho_{\text{б.сух}})$ и на их основании выбирают оптимальный состав бетона.

Легкий беспесчаный бетон с поризованным цементным камнем рационально применять при использовании пористого заполнителя с плотностью свыше 500 кг/м³. Влияние свойств заполнителя и поризованного цементного камня на свойства легкого бетона приведено в табл. 13.14.

■ Состав беспесчаного легкого бетона, поризованного пено- или газообразующими добавками, подбирают в такой последовательности: 1) устанавливают расход заполнителя; 2) определяют объем ячеистого бетона; 3) рассчитывают и уточняют в опытных замесах состав ячеистого бетона, обеспечивающий заданные подвижность бетонной смеси и прочность затвердевшего легкого бетона. При этом бетон должен иметь плотную (слитную) структуру.

Таблица 13.14. Свойства легкого беспесчаного поризованного бетона

Средняя плотность, кг/м³			Предел прочности при сжатии, МПа		Расход смеси вяжущего с пылевидной добавкой, кг/м³	
пористого заполнителя	поризованного цементного камня	легкого бетона с поризованным цементным камнем	после автоклавной обработки	после пропаривания		
500	500	700	4	3	200	
		$\frac{750}{800}$			3,5	250
		$\frac{875}{900}$			4,5	280
700	700	800	8	5,5	350	
		$\frac{875}{900}$			7	360
		$\frac{1000}{1000}$			12	450
900	900	800	13	8,5	200	
		$\frac{850}{900}$			4,5	250
		$\frac{975}{1000}$			3,5	280
600	500	900	8	5	280	
		$\frac{975}{1000}$			9	350
		$\frac{1000}{1100}$			13,5	360
900	900	1000	14,5	9,5	450	
		$\frac{1100}{1100}$			8	200
		$\frac{900}{950}$			4	250
500	500	900	6	4,5	280	
		$\frac{950}{1000}$			9	360
		$\frac{1000}{1075}$			10	360
700	700	1100	15	7	280	
		$\frac{1100}{1200}$			9	360
		$\frac{1000}{1050}$			5,5	250
500	500	1050	6,5	5	280	
		$\frac{1100}{1175}$			10	350
		$\frac{1200}{1200}$			11	460
800	700	1100	16,5	10	460	
		$\frac{1175}{1200}$			17,5	450
		$\frac{1200}{1300}$			11,5	

Примечание. В числителе — данные для керамзита, в знаменателе — для других пористых заполнителей.

Зерновой состав пористого заполнителя устанавливают из условия получения минимальной пустотности, его плотность и прочность должны соответствовать заданным свойствам легкого бетона.

Расход (л) пористого заполнителя

$$V_{\text{ш}} = \frac{1000}{1 + P_{\text{ш}}(\alpha - 1)}, \quad (13.20)$$

где $P_{\text{ш}}$ — межзерновая пустотность заполнителя; α — коэффициент раздвижки зерен заполнителя, принимаемый равным 1,1 ... 1,2.

Объем ячеистого бетона (л) подсчитывают из условия заполнения межзерновых пустот заполнителя с некоторым избытком:

$$V_{\text{яч.б}} = V_{\text{ш}} P_{\text{ш}} \alpha. \quad (13.21)$$

Плотность ячеистого бетона в сухом состоянии устанавливают из условия получения заданной плотности легкого бетона:

$$\rho'_{\text{яч.б}} = (1000\rho'_6 - V_{\text{ш}}\rho'_{\text{ш}})/V_{\text{яч.б}}, \quad (13.22)$$

где $\rho_{\text{ш}}$ — насыпная плотность пористого заполнителя, кг/л.

Состав ячеистого бетона определяют по методике, изложенной в § 13.4. При этом его прочность должна быть не менее заданной прочности легкого бетона. Учитывая, что изделия из поризованного бетона подвергают, как правило, тепловлажностной обработке при атмосферном давлении, для уменьшения расхода цемента рекомендуется применять активные кремнеземистые добавки.

Для опытных замесов рассчитывают три состава легкого бетона с расходом пористого заполнителя, определяемым по формуле и отличающимся на $\pm 10\%$. По данным испытания опытных образцов, прошедших тепловлажностную обработку по заданному режиму, выявляют зависимость между прочностью легкого бетона и плотностью ячеистого бетона. Принимают оптимальный состав бетона, обеспечивающий получение легкого бетона заданной прочности и плотности при наименьшем расходе цемента.

§ 13.3. КРУПНОПРИСТЫЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН

■ Состав крупнопористого конструктивно-теплоизоляционного бетона на легких заполнителях определяют также расчетно-экспериментальным методом. При этом задаются классом и плотностью бетона. Крупнопористые бетоны на легких заполнителях отличаются высокой жесткостью, поэтому при определении их состава контролируют нерасслаиваемость бетонной смеси.

Расход цемента для получения крупнопористого бетона устанавливают по табл. 13.15.

Расход крупного заполнителя Ш принимают в зависимости от его пустотности $P_{\text{ш}}$: при $P_{\text{ш}}=40\%$ $\text{Ш}=1,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при $P_{\text{ш}}=50\%$ $\text{Ш}=1,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$, при $P_{\text{ш}}=60\%$ $\text{Ш}=1,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Для производственного состава расход заполнителя увеличивают на 5 ... 15% в зависимости от особенностей смеси и прочности заполнителя; при перемешивании часть его зерен может разрушаться.

Расход воды, (л)

$$V = (НГ \cdot Ц + \text{Ш}\omega_{30})/100, \quad (13.23)$$

где НГ — нормальная густота цементного теста, %; ω_{30} — водопоглощение по массе сухого крупного заполнителя за 30 мин, %.

Таблица 13.15. Ориентировочный расход цемента М300 для крупнопористого бетона на легких заполнителях

Заполнитель	Плотность заполнителя в уплотненном состоянии, кг/м ³	Прочность бетона, МПа	
		3,5	5,0
Керамзитовый гравий	500...800	225...190	300...235
Аглопорит, шлаковая пемза, природные крупнопористые заполнители	500...800	215...155	250...180
Природные мелкопористые заполнители	800...1200	285...180	275...210

Плотность сухого бетона

$$\rho'_6 = 1,5Ц + Ш. \quad (13.24)$$

Для уточнения расхода цемента и воды готовят три опытных замеса: один с расчетным количеством цемента и два, отличающихся от первого на $\pm 15 \dots 20\%$. Оптимальное количество воды принимают по составу смеси, имеющей наибольшую плотность и показатель расслаиваемости менее 10%. Если бетонная смесь имеет плотность больше заданной, то в нее добавляют крупный заполнитель или заменяют его более легким.

Оптимальный состав бетона устанавливают по результатам испытания образцов на прочность.

Пример 13.4. Определить состав крупнопористого легкого бетона М50. Материалы: цемент М300 с нормальной густотой 26%, керамзитовый гравий с насыпной плотностью 600 кг/м³, плотностью зерен 1,2 кг/л и водопоглощением 35%.

По табл. 13.15, ориентировочный расход цемента 270 кг/м³.

Пустотность заполнителя $P_{\text{ш}} = [(1,2 - 0,6) / 1,2] 100 = 50\%$.

Расход крупного заполнителя принимают 1,15 м³/м³, или $600 \cdot 1,15 = 690$ кг/м³.

Расход воды $V = (26 \cdot 270 + 690 \cdot 35) / 100 = 310$ л.

Полученный состав уточняют после проведения пробных замесов.

§ 13.4. ЯЧЕЙСТЫЙ БЕТОН

● *Ячеистый бетон* — это особо легкий бетон с большим количеством (до 85% от общего объема бетона) мелких и средних воздушных ячеек размером до 1...1,5 мм. Пористость ячеистым бетонам придается: а) механическим путем, когда тесто, состоящее из вяжущего и воды, часто с добавкой мелкого песка, смешивают с отдельно приготовленной пеной; при отверждении получается пористый материал, называемый пенобетоном; б) химическим путем, когда в вяжущее вводят специальные газообразующие до-

бавки; в результате в тесте вяжущего вещества происходит реакция газообразования, оно вспучивается и становится пористым. Затвердевший материал называют газобетоном.

Ячеистые бетоны по плотности и назначению делят на теплоизоляционные с плотностью 300...600 кг/м³ и прочностью 0,4...1,2 МПа и конструктивные с плотностью 600...1200 кг/м³ (чаще всего около 800 кг/м³) и прочностью 2,5...15 МПа.

В СССР широко развивается производство изделий из автоклавных ячеистых бетонов, т. е. твердеющих в автоклавах при пропаривании под давлением 0,8...1 МПа. Автоклавные ячеистые бетоны изготавливают из следующих смесей: а) цемента с кварцевым песком, при этом часть песка обычно размалывают; б) молотой негашеной извести с кварцевым частично измельченным песком; такие ячеистые бетоны называют пеносиликатами или газосиликатами; в) цемента, извести и песка в различных соотношениях. Песок в этих изделиях может быть заменен золой. Тогда получают пенозолобетон или газозолобетон. Портландцемент применяют алитовый ($C_3S > 50\%$), низко- и среднеалюминатный ($C_3A = 5 \dots 8\%$) с началом схватывания не позднее чем через 2 ч.

Для ячеистых бетонов неавтоклавного твердения применяют цементы не менее М400. При этих условиях достигается в короткий срок необходимая устойчивость ячеистой массы до ее тепловлажностной обработки. Применять пуццолановый портландцемент и шлакопортландцемент, отличающиеся замедленными сроками схватывания, без опытной проверки не рекомендуется. Они могут явиться также причиной повышенной усадки ячеистой массы после заполнения формы.

Для автоклавного ячеистого бетона наиболее целесообразно использовать портландцемент совместно с известью-кипелкой (смешанное вяжущее) в отношении 1:1 по массе. Для приготовления автоклавных ячеистых бетонов применяют известь с содержанием активной CaO не менее 70%, MgO не более 5%, высокоэкзотермическую с температурой гашения около 85°C. Тонкость помола молотой извести-кипелки должна быть не ниже 3500...4000 см²/г.

В качестве кремнеземистого компонента рекомендуется применять тонкомолотые кварцевые пески, содержащие не менее 90% кремнезема, не более 5% глины и 0,5% слюды. Песок в зависимости от плотности ячеистого бетона должен иметь удельную поверхность 1200...2000 см²/г.

Зола-унос, применяемая вместо молотого песка, отличается неоднородностью химико-минералогического состава. Зола характеризуется высокой пористостью и дисперсностью. Эти особенности свойств золы способствуют повышенной влагоемкости и замедленной водоотдаче бетона, его пониженной трещиностойкости. К преимуществам золы по сравнению с песком можно отнести возможность применения ее в отдельных случаях без предвари-

тельного размола. Это позволяет получать изделия меньшей плотности, чем с кварцевым песком. Зола-унос должна содержать кремнезема не менее 40%; потеря в массе при прокаливании в золах, получаемых при сжигании антрацита и каменного угля, не должна превышать 8%, а для остальных зол — 5%; удельная поверхность — 2000...3000 см²/г. Другие кремнеземистые алюмосиликатные и кальцево-алюмосиликатные компоненты (трепел, трассы, опока и др.), характеризующиеся повышенной водопотребностью, для таких бетонов почти не используют.

Для образования ячеистой структуры бетона применяют пенообразователи и газообразователи. В качестве пенообразователей используют несколько видов поверхностно-активных веществ, способствующих получению устойчивых пен.

Клееканифольный пенообразователь готовят из мездрового или костного клея, канифоли и водного раствора едкого натра. Этот пенообразователь при длительном взбивании эмульсии дает большой объем устойчивой пены. Он несовместим с ускорителями твердения цемента кислотного характера, так как они вызывают свертывание клея. Хранят его не более 20 сут в условиях низкой положительной температуры.

Смолосапониновый пенообразователь готовят из мыльного корня и воды. Введение в него жидкого стекла в качестве стабилизатора увеличивает стойкость пены. Этот пенообразователь сохраняет свои свойства при нормальной температуре и влажности воздуха около 1 мес.

Алюмосульфатноглицериновый пенообразователь получают из керосинового контакта, сернокислого глинозема и едкого натра. Он сохраняет свои свойства при положительной температуре до 6 мес.

Пенообразователь ГК готовят из гидролизованной боенской крови марки ПО-6 и сернокислого железа. Его можно применять с ускорителями твердения. Этот пенообразователь сохраняет свои свойства при нормальной температуре до 6 мес.

Расход пенообразователя для получения пены составляет: клееканифольного — 8...12%; смолосапонинового — 12...16%; алюмосульфатноглицеринового — 16...20 и пенообразователя ГК — 4...6% от количества воды. Смесь из двух пенообразователей (например, ГК и эмульсии мыльного корня в соотношении 1:1) позволяет получить более устойчивую пену, но это несколько усложняет технологию.

В качестве газообразователя в производстве газобетона и газосиликата применяют алюминиевую пудру, которую выпускают четырех марок. Для производства газобетона используют пудру марки ПАК-3 или ПАК-4 с содержанием активного алюминия 82% и тонкостью помола 5000...6000 см²/г. Расход алюминиевой пудры зависит от плотности получаемого газобетона и составляет 0,25...0,6 кг/м³.

При производстве алюминиевой пудры для защиты ее от окис-

ления вводят парафин, который обволакивает тонкой пленкой каждую частицу алюминия, придавая ему гидрофобность. Такая пленка препятствует осаждению пудры в воде и образованию водой суспензии. Поэтому алюминиевую пудру (слой толщиной 4 см) предварительно в течение 4...6 ч прокалывают в электрических печах при температуре 200...220 °С.

Применяют также способ приготовления суспензии с растворами поверхностно-активных веществ (канифольного мыла, мылонафта сульфанола, СДБ и др.), которые придают чешуйкам пудры гидрофилность. Обработка пудры растворами СДБ или смолосапонинового пенообразователя замедляет газообразование, уменьшает количество выделяемого газа, приводит к меньшим дефектам структуры бетона. Расход поверхностно-активной добавки (в пересчете на сухое вещество) составляет около 5% от массы пудры.

Для замедления скорости гашения молотой известки-кипелки добавляют двухводный гипс. Он должен иметь тонкость помола, характеризуемую остатком на сите № 02 не более 3%. Допускается применять полуводный гипс вместе с добавкой поташа. Использование для этой цели других добавок (кератинового замедлителя, животного клея, поверхностно-активных добавок), менее эффективно.

При определении состава ячеистого бетона необходимо обеспечить заданную плотность и его наибольшую прочность при минимальных расходах порообразователя и вяжущего вещества. При этом структура ячеистого бетона должна характеризоваться равномерно распределенными мелкими порами правильной шаровидной формы.

Плотность ячеистого бетона и его пористость зависят главным образом от расхода порообразователя и степени использования его порообразующей способности. Некоторое влияние на них оказывают температура смеси и количество воды, принятое для затворения смеси, т. е. водотвердое отношение В/Т (отношение объема воды к массе вяжущего вещества и кремнеземистой добавки). Увеличение В/Т повышает текучесть смеси, а следовательно, улучшает условия образования пористой структуры, если обеспечивается достаточная пластичная прочность смеси к концу процесса газообразования.

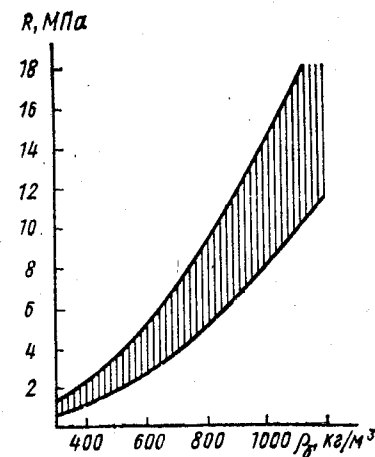


Рис. 13.6. Зависимость прочности ячеистого бетона R_6 от его плотности ρ_c

Таблица 13.16. Значения c

Вязущее	Отношение кремнеземистого компонента к вяжущему по массе в ячеисто-бетонной смеси	
	для автоклавного бетона	для безавтоклавного бетона на золе-уносе
Цементное и цементно-известковое	0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75 и 2	0,75; 1; 1,25
Известковое	3; 3,5; 4; 4,5; 5,5 и 6	—
Известково-белитовое	1; 1,25; 1,5; 2	—
Известково-шлаковое	0,6; 0,8; 1	0,6; 0,8; 1
Высокоосновное зольное	0,75; 1; 1,25	—
Шлакощелочное	0,1; 0,15; 0,20	—

На рис. 13.6 приведена зависимость прочности ячеистого бетона от его плотности. Прочность ячеистого бетона зависит также от характера его пористости, размеров и структуры пор и прочности межпоровых оболочек. С увеличением В/Т до оптимального значения, обеспечивающего наилучшие условия формирования структуры смеси, прочность ячеистого бетона повышается. Прочность оболочек, в свою очередь, зависит от оптимального соотношения основного вяжущего и кремнеземистого компонента, В/Т, а также условий тепловлажностной обработки. Из этого следует, что применение смесей с минимальным значением В/Т при условии образования высококачественной структуры (например, виброиспуциванием) позволяет получить ячеистый бетон более высокой прочности.

■ Подбор состава ячеистого бетона производят в такой последовательности:

1) принимают отношение c кремнеземистого компонента к вяжущему в смеси (табл. 13.16);

2) определяют водотвердое отношение В/Т, обеспечивающее заданную текучесть растворной смеси, удовлетворяющую требованиям табл. 13.17 с учетом температуры смеси в момент выгрузки из форм (табл. 13.18);

3) определяют количество порообразователя на замес P_n ;

4) устанавливают расход сухих материалов, добавок и воды на пробный замес. При этом принимают во внимание не только свойства ячеистого бетона, но и условия его формирования — температуру испуцивания и время схватывания.

Для расчета количества порообразователя, необходимого для получения ячеистого бетона заданной плотности, определяют предварительную пористость бетона P_p :

$$P_p = 1 - (\rho'_c / k_c) (V_{уд} + В/Т), \quad (13.25)$$

где ρ'_c — плотность ячеистого бетона в высушенном состоянии; k_c — коэффициент, учитывающий связанную воду в материале; $V_{уд}$ — удельный объем сухой смеси.

Таблица 13.17. Текучесть ячеисто-бетонной смеси

Заданная плотность ячеистого бетона, кг/м ³	Диаметр расплава смеси, см		
	на цементном, известково-цементном, шлакощелочном вяжущем	на известковом, известково-шлаковом и известково-белитовом вяжущем	на высокоосновном зольном вяжущем
<i>При литевой технологии</i>			
300	38	30	—
400	34	25	25
500	30	23	23
600	26	21	21
700	22	19	20
800	18	17	18
<i>При вибрационной технологии</i>			
500	15	—	—
600	13	—	—
700	11	—	—
800	9	—	—

Таблица 13.18. Температура ячеисто-бетонной смеси

Ячеистый бетон и вяжущее	Температура растворной смеси, °С, в момент выгрузки в формы	
	при литевой технологии	при вибрационном формировании
Газобетон:		
на цементе	45	45
на известково-цементном вяжущем	35	40
на известково-шлаковом вяжущем или высокоосновном зольном вяжущем	40	45
газосиликат на извести-кипелке и известково-белитовом вяжущем	30	40
Пенобетон:		
на цементе	25	—
на шлакощелочном вяжущем	15	—

Расход порообразователя P_n (алюминиевой пудры или водного раствора пенообразователя) на замес

$$P_n = [P_p / (a k)] V, \quad (13.26)$$

где a — коэффициент использования порообразователя; V — заданный объем ячеисто-бетонной смеси; k — коэффициент выхода порообразователя.

Для расчетов принимают следующие исходные значения: $k_c = 1,1$; $k = 1390$ л/кг при использовании алюминиевой пудры при

температуре растворной смеси 40°C и $k=20$ л/кг в случае применения пенообразователя; $\alpha=0,85$.

Исходные значения α и k_c уточняют по фактическим данным средней плотности растворной смеси $\rho'_{\phi c}$; ячеисто-бетонной смеси $\rho'_{\phi я.с}$ и ячеистого бетона в сухом состоянии $\rho'_{\phi p}$.

Затем определяют фактическую пористость:

$$P_{\phi} = 1 (\rho'_{\phi я.с} / \rho'_{\phi p}); \quad (13.27)$$

уточняют коэффициент использования порообразователя:

$$\alpha = P_{\phi} / (P_{п} k_c), \quad (13.28)$$

а также уточняют коэффициент k_c , учитывающий связанную воду в материале:

$$k_c = \frac{\rho'_{\phi c}}{\rho'_{\phi я.с}} (1 + B/T). \quad (13.29)$$

Расход материалов на замес:

$$P_{сух} = (\rho'_{\phi c} / k_c) V; \quad (13.30)$$

$$P_{вяж} = P_{сух} / (1 + C); \quad (13.31)$$

$$P_{ц} = P_{вяж} n; \quad (13.32)$$

$$P_{и} = P_{вяж} (1 - n); \quad (13.33)$$

$$P_{и\phi} = (P_{и} / A_{\phi}) 100; \quad (13.34)$$

$$P_{в} = P_{сух} B/T; \quad (13.35)$$

$$P_{к} = P_{сух} - (P_{ц} + P_{и\phi}); \quad (13.36)$$

где $P_{сух}$ — расход материалов на замес; $\rho'_{\phi c}$ — плотность ячеистого бетона, высушенного до постоянной массы; k_c — коэффициент увеличения массы за счет связанной воды (предварительно принимают $k_c=1,1$); V — заданный объем одновременно формируемых изделий, увеличенный с учетом образования «горбушки» на 7...10% для индивидуальных форм и на 3...5% для массивов; $P_{вяж}$ — масса вяжущего; n — доля цемента в смешанном вяжущем; $P_{и}$ — масса товарной извести, содержащей 100% CaO; $P_{и\phi}$ — масса товарной извести (активность); A_{ϕ} — фактическое содержание CaO в товарной извести (активность); $P_{в}$ — масса воды; $P_{к}$ — масса кремнеземистого компонента.

При проведении опытов для получения расчетных зависимостей на реальных материалах в условиях конкретного производства для пробных замесов можно принимать усредненные расходы материалов (табл. 13.19).

При этом для расчетов материалов на замес бетоносмесителя принимают следующие значения B/T : для ячеистого бетона при

Таблица 13.19. Усредненный расход материалов для ячеистого бетона

Ряд ячеистого бетона	Плотность бетона, кг/м³	Расход, кг					гипса
		известки-пелли активностью 70%	цемента	песка молотого	зола-уноса	доменного шлака	
Газосиликат	350	72	—	247	—	—	3
	500	110	—	345	—	—	5
	600	130	—	415	—	—	6
	700	142	—	494	—	—	6
	800	162	—	564	—	—	7
Газозлосиликат	350	72	—	—	247	—	3
	500	110	—	—	345	—	5
	600	130	—	—	415	—	6
	700	142	—	—	494	—	6
	800	162	—	—	564	—	7
На смешанном вяжущем с применением песка	350	36	36	247	—	—	3
	500	90	90	275	—	—	4
	600	110	110	325	—	—	5
	700	130	120	386	—	—	6
	800	140	140	446	—	—	7
То же, с применением золы	350	49	80	—	190	—	3
	500	70	115	—	275	—	4
	600	80	130	—	325	—	5
	700	100	150	—	386	—	6
	800	120	170	—	436	—	7
Газошлакобетон	350	25	—	145	—	140	1
	500	35	—	240	—	180	1
	600	45	—	256	—	244	2
	700	50	—	300	—	286	2
	800	60	—	326	—	340	2
Газобетон	350	—	140	179	—	—	2
	500	—	220	236	—	—	3
	600	—	260	285	—	—	4
	700	—	300	336	—	—	6
	800	—	350	376	—	—	6

Таблица 13.20. Расход алюминиевой пудры в ячеистом бетоне

Плотность ячеистого бетона, кг/м³	Усредненный расход пудры, г	Плотность ячеистого бетона, кг/м³	Усредненный расход пудры, г
350	690	700	360
500	535	800	300
600	470		

Примечание. При работе с повышенным B/T расход пудры на 10% меньше.

обычной технологии на песке — 0,5; на золе — 0,6; для ячеистого бетона при вибротехнологии и технологии с использованием высокоэффективных пластификаторов типа С-3 на песке — 0,3; на золе — 0,4.

Расход алюминиевой пудры на 1 м³ ячеистого бетона можно ориентировочно принимать по табл. 13.20.

ГЛАВА 14

ОСОБЫЕ ВИДЫ БЕТОНА

§ 14.1. СИЛИКАТНЫЙ БЕТОН

● *Силикатный бетон представляет собой бесцементный бетон автоклавного твердения.* Вяжущим в нем является смесь извести с тонкомолотым кремнеземистым материалом. В процессе автоклавной обработки известь вступает с кремнеземистым компонентом в химическую реакцию, в результате которой образуются гидросиликаты кальция, скрепляющие зерна заполнителя в прочный монолит. В зависимости от вида кремнеземистого компонента различают следующие виды вяжущего вещества: известково-кремнеземистые, состоящие из тонкомолотых извести и песка; известково-шлаковые, получаемые совместным помолом металлургического или топливного шлака и извести; известково-золевые, состоящие из тонкомолотых извести и топливных зол; известково-аглопоритовые, получаемые из извести и отходов производства искусственных пористых заполнителей, и известково-белитовые, состоящие из тонкомолотых продуктов низкотемпературного обжига известково-кремнеземистой шихты и песка или белитового (нефелинового) шлака и песка. Соотношение извести и кремнеземистого компонента составляет от 30 : 70 до 50 : 50%. В качестве мелко-го заполнителя применяют природные и дробленые пески, удовлетворяющие стандартным требованиям. В крупнозернистых бетонах используют щебень из плотных горных пород, щебень из гравия или доменного шлака размером не более 20 мм, а также различные пористые заполнители.

Для регулирования свойств вяжущего, бетонной смеси и бетона применяют специальные добавки: гипсовый камень для замедления гидратации извести; триэтаноламин для повышения помолоспособности компонентов вяжущего и пластификации бетонной смеси; кремнийорганические жидкости ГКЖ-10 и ГКЖ-11 для гидрофобизации и повышения долговечности бетона, суперпластификаторы и др.

Наибольшее распространение получили мелкозернистые силикатные бетоны, заполнителем которых является обычный кварцевый песок. Песок обладает более высокой удельной поверхно-

стью и, следовательно, лучшей реакционной способностью, а также меньшей стоимостью, чем крупный заполнитель, поэтому мелкозернистые силикатные бетоны наряду с хорошими техническими свойствами имеют низкую стоимость.

Прочность силикатного бетона меняется в широких пределах: 5...10 МПа в легких силикатных бетонах, 20...50 МПа в тяжелых бетонах и 80...100 МПа в высокопрочных бетонах. Из силикатного бетона производят плиты перекрытий, колонны, ригели, балки, ограждающие панели, стеновые блоки и другие детали.

■ Состав силикатного бетона рассчитывают двумя способами. Если известна активность известково-кремнеземистого вяжущего, определенная по стандартной методике, но с применением автоклавной обработки, то можно использовать расчетно-экспериментальный метод для цементного тяжелого бетона (см. гл. 10), вводя в него необходимые поправки, учитывающие особенности свойств и технологии силикатного бетона.

При определении водоцементного отношения по формулам (10.10) и (10.11) учитывают активность известково-кремнеземистого вяжущего. Прочность силикатного бетона устанавливают по результатам испытания после автоклавной обработки. Расход воды в силикатных бетонах устанавливают по результатам предварительных испытаний бетонной смеси состава 1 : 1 : 2 и уточняют по результатам пробных замесов. Коэффициент раздвижки α принимают на 0,1...0,2 больше значений, рекомендованных в табл. 10.5, чтобы повысить связанность и монолитность структуры бетона.

При определении состава мелкозернистого силикатного бетона коэффициент A в формуле (10.10) принимают равным 0,5. Ориентировочный расход воды, требуемый для получения заданной подвижности, устанавливают предварительными испытаниями бетонной смеси состава 1 : 3 и уточняют в пробных замесах. Расход песка

$$П = [1000 - (Ц_{ик}/\rho_{ик} + В)] \rho_{п}, \quad (14.1)$$

где $Ц_{ик}$ — расход известково-кремнеземистого вяжущего, кг; $\rho_{ик}$ — истинная плотность вяжущего, кг/л; $\rho_{п}$ — истинная плотность песка, кг/л.

Окончательный расход материалов уточняют по результатам пробных замесов.

Если активность известково-кремнеземистого вяжущего неизвестна, то состав можно рассчитать на основе опытных зависимостей, предложенных ВНИИстромом, связывающих прочность силикатного бетона с его плотностью, качеством извести, водоцементным отношением, тонкостью помола песка, соотношением между известью и тонкомолотым песком и другими факторами.

При использовании негашеной извести ориентировочно проч-

ность плотного силикатного бетона можно определить по формуле

$$R_b = 40,5 \left(\frac{s_{м.п}}{1000} + \frac{1,6}{Ц/В-1} \right) + 180, \quad (14.2)$$

где $s_{м.п}$ — удельная поверхность молотого песка, см²/г.

При использовании гашеной извести, обладающей весьма развитой удельной поверхностью, изменение дисперсности молотого песка оказывает незначительное влияние на прочность бетона и им можно пренебречь. Поэтому ориентировочно прочность силикатного бетона в этом случае можно определить по формуле

$$R_{м.б} = 160 (Ц/В-1) + 140. \quad (14.3)$$

Однако для получения качественного бетона необходимо песок, используемый в качестве тонкомолотой добавки, домальвать вместе с известью-пушонкой. Вследствие повышенной плотности силикатный бетон на негашеной извести на 20...30% прочнее бетона на гашеной извести (при одинаковых В/Ц).

Минимальное количество известково-песчаного вяжущего, обеспечивающее получение плотного бетона,

$$Ц_0 = \frac{1 - ВВ - \rho'_n k_y / (\rho_{пм})}{1, \rho_{пк} + В/Ц}, \quad (14.4)$$

где ВВ — объем воздуха, заземленного в уплотненной силикатобетонной смеси; $k_y = \rho'_{н.п} / \rho'_n$ — коэффициент уплотнения песка при различных способах формирования; ρ'_n — плотность сухого немолотого песка в уплотненном состоянии (при объемном вибрировании с пригрузом ВВ=0,05; $k_y=1,15...1,25$; при формировании скользящим виброштампом ВВ=0,04, $k_y=1,3...1,4$; при формировании на стенде силового вибропроката ВВ=0,035; $k_y=1,35...1,45$); m — коэффициент раздвижки зерен немолотого песка тонкомолотой добавкой и известью:

$$m = \left[\frac{D_{ср} - d_{ср}}{D_{ср}} \right]^3, \quad (14.5)$$

здесь $D_{ср}$ — средний поперечник зерен немолотого песка, мм;

$$D_{ср} = \frac{3,1a_1 + 0,9a_2 + 0,45a_3 + 0,25a_4 + 0,12a_5 + 0,45a_6}{100},$$

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 — частные остатки соответственно на 1,2; 0,6; 0,3; 0,15; 0,09 мм; a_6 — количество песка, прошедшее через сито 0,09 мм; $d_{ср}$ — средний поперечник зерен молотого песка, мм;

$$d_{ср} = 26,5 / (s_{м.п} - 850). \quad (14.6)$$

Таблица 14.1. Влажность силикатобетонной смеси, обеспечивающая данную жесткость смеси на различных песках

Влажность смеси, %	Жесткость, с, при применении песка			
	очень мелкого $\rho'_n = 1,2...1,29$	мелкого $\rho'_n = 1,3...1,39$	среднего $\rho'_n = 1,4...1,55$	крупного $\rho'_n = 1,56...1,65$
11	—	—	—	25
12	—	—	30	15
14	—	30	15	6
16	20	10	5	3
17	15	6	4	2

Таблица 14.2. Жесткость силикатобетонной смеси

Способ формирования	Жесткость наибольшая, с	Время виброуплотнения, мин
Вибропрокат плит с применением вибросердечников	30	3,5
Вибропрокат	25	3
Виброштампование	20	2,5
На виброплощадках с пригрузом 0,5 МПа	15	2
В кассетных формах	4	1...1,5
На виброплощадках	4	1...1,5

Для придания силикатобетонной смеси требуемой подвижности расход вяжущего увеличивают. Действительный расход вяжущего (т/м³)

$$Ц = n Ц_0, \quad (14.7)$$

где n — коэффициент избытка теста вяжущего.

Коэффициент n зависит от требуемой влажности смеси, поскольку именно влажность смеси определяет ее жесткость (табл. 14.1). Жесткость смеси, необходимая для ее качественного уплотнения при различных способах формирования изделий, приведена в табл. 14.2.

Расход извести, т/м³

$$И = И_a / A, \quad (14.8)$$

$$И_a = Ц / (1/a + 1,54), \quad (14.9)$$

где $И_a$ — содержание активной извести, т/м³; A — содержание активного оксида кальция в товарной извести, доли единицы; a — соотношение между активным оксидом кальция и молотым песком.

Соотношение между активным оксидом кальция и молотым песком в вяжущем назначают исходя из условия получения в результате автоклавной обработки гидросиликатов кальция оптимального состава при минимальном расходе извести. В зависимости от крупности песка заданной прочности силикатного бетона расход активного оксида кальция можно определить по табл. 14.3.

Таблица 14.3. Содержание активного оксида кальция силикатобетонной смеси, % от массы уплотненной силикатобетонной смеси

Прочность бетона, МПа	Песок				Прочность бетона, МПа	Песок			
	очень мелкий	мелкий	средний	крупный		очень мелкий	мелкий	средний	крупный
20	6,5	6,2	6	5,8	40	9	8,5	8	7,5
30	7,5	7,2	7	6,5	50	10,5	9,5	8,5	8

Расход молотого песка (т/м³)

$$P_m = C - I. \quad (14.10)$$

Расход немолотого песка-заполнителя (т/м³)

$$P_m = 2,5 - (2,5 - \rho_n / m). \quad (14.11)$$

Количество воды в бетонной смеси (л/м³)

$$B = C \cdot B / C. \quad (14.12)$$

Плотность уплотненного силикатного бетона (т/м³)

$$\rho'_6 = C + P_n. \quad (14.13)$$

■ При определении состава силикатного бетона следует иметь в виду следующее: 1) чем мельче песок, служащий заполнителем, тем меньше должна быть размолота та часть песка, которая входит в состав вяжущего; 2) чем выше заданная прочность бетона, тем больше расход вяжущего; 3) расход вяжущего для получения силикатного бетона заданной прочности уменьшается при увеличении дисперсности мелкого песка и растет при увеличении формовочной влажности силикатобетонной смеси; 4) дисперсность молотой извести должна быть в 2...2,5 раза выше дисперсности молотого песка.

Для быстрого определения ориентировочного состава силикатного бетона прочности 20 МПа можно пользоваться графиком (рис. 14.1), составленным на основе приведенных формул. В этом случае вначале по табл. 14.2 определяют необходимую жесткость смеси, затем по табл. 14.1 устанавливают влажность смеси и по графику на рис. 14.1 определяют расходы вяжущего, активной извести, немолотого песка, воды затворения и плотности свежеуложенного бетона.

Пример 14.1. Подобрать состав силикатного бетона для изготовления сплошных панелей перекрытий на вибропроткатной машине с вибросердечниками. Материалы: песок с насыпной плотностью $\rho'_n = 1,35$ кг/л, известь с активностью 0,6, требуемая прочность бетона 20 МПа.

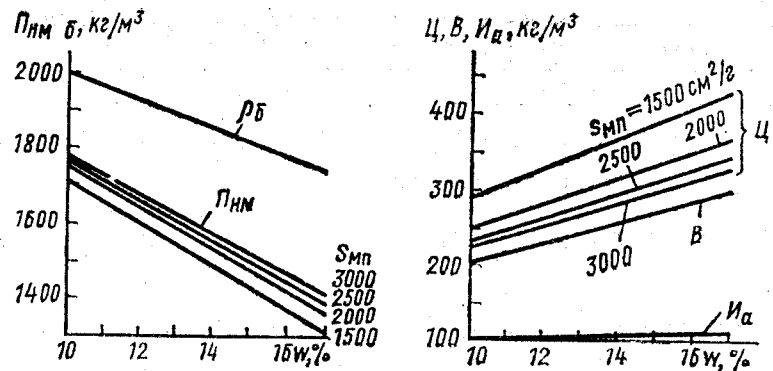


Рис. 14.1. Состав силикатного бетона М200 в зависимости от влажности смеси и дисперсности молотого песка:

I_a — содержание активной извести; B — количество воды и смеси; C — содержание известково-песчаного вяжущего; $P_{н,м}$ — содержание немолотого песка; ρ_6 — плотность уплотненного бетона; $s_{м,п}$ — удельная поверхность молотого песка

По табл. 14.2, жесткость смеси $Ж = 30$ с. По табл. 14.1, для песка с $\rho'_n = 1,35$ кг/л для обеспечения заданной жесткости влажность смеси должна быть 14%. В связи с тем что песок мелкий, принимают удельную поверхность молотого песка $s_{м,п} = 2000$ см²/г. По графику рис. 14.1 для бетона с прочностью 20 МПа при влажности 14% и $s_{м,п} = 2000$ см²/г находят: $C = 330$ кг/м³, $P_n = 1550$ кг/м³, $\rho'_6 = 1850$ кг/м³, $B = 260$ л/м³, $I_a = 110$ кг/м³. Затем определяют $I = 110 / 0,6 = 184$ кг/м³ и $P_m = 330 - 184 = 146$ кг/м³.

Подобранный по графикам или рассчитанный состав силикатного бетона уточняют на образцах, изготовленных из смесей с одинаковым B/C при расходе вяжущего 0,9 C ; C ; 1,1 C и выбирают оптимальный состав, отвечающий заданным условиям.

§ 14.2. ЦЕМЕНТНО-ПОЛИМЕРНЫЙ БЕТОН

● Цементно-полимерные бетоны — это цементные бетоны с добавками различных высокомолекулярных органических соединений в виде водных дисперсий полимеров — продуктов эмульсионной полимеризации различных полимеров: винилацетата, винилхлорида, стирола, латексов и других или водорастворимых коллоидов: поливинилового и фурилового спиртов, эпоксидных водорастворимых смол, полиамидных и мочевиноформальдегидных смол. Добавки вводят в бетонную смесь при ее приготовлении. Использование в бетоне полимеров позволяет изменять его структуру и свойства в нужном направлении, улучшать технико-экономические показатели материала.

Формы использования полимеров в бетоне многообразны. Полимеры и материалы на их основе применяют в виде добавок в

бетонную смесь, в качестве вяжущего, для пропитки готовых бетонных и железобетонных изделий, для дисперсного армирования полимерными волокнами, в виде легких заполнителей или модификации свойств минеральных заполнителей, в качестве микрозаполнителя. Каждое из этих направлений имеет свои области применения и технологические особенности.

Здесь и далее рассмотрены бетоны, в которые вводится заметное количество полимеров, создающих в структуре материала полимерную фазу и существенно влияющих на его строение и свойства. В мировой практике для таких бетонов начали употреблять термин «П-бетоны». Подобные материалы можно подразделять на четыре группы: цементно-полимерные бетоны, полимербетоны, бетонополимеры и бетоны, содержащие полимерные материалы (заполнители, дисперсную арматуру или микрозаполнители).

Цементно-полимерные бетоны характеризуются наличием двух активных составляющих: минерального вяжущего и органического вещества. Вяжущее вещество с водой образует цементный камень, склеивающий частицы заполнителя в монолит. Полимер по мере удаления воды из бетона образует на поверхности пор, капилляров, зерен цемента и заполнителя тонкую пленку, которая обладает хорошей адгезией и способствует повышению сцепления между заполнителем и цементным камнем, улучшает монолитность бетона и работу минерального скелета под нагрузкой. В результате цементно-полимерный бетон приобретает особые свойства: повышенную по сравнению с обычным бетоном прочность на растяжение и изгиб, более высокую морозостойкость, хорошие адгезионные свойства, высокую износостойкость, непроницаемость. В то же время особенности полимерной составляющей определяют и другие особенности цементно-полимерного бетона, в ряде случаев несколько повышенную деформативность, снижение показателей прочности при водном хранении.

Наиболее распространенными добавками полимеров в цементные бетоны являются поливинилацетат (ПВА), латексы и водорастворимые смолы. ПВА представляет собой смолу, свойства которой, как и всех высокомолекулярных соединений, зависят от степени полимеризации винилацетата, температуры и влажности. Обычно применяется ПВА в виде эмульсии, содержащей около 50% сухого вещества и некоторого количества поливинилового спирта как эмульгатора. После высыхания образуется твердая пленка, обладающая некоторым водопоглощением и набуханием. Влажное хранение ПВА сопровождается снижением прочности, а после высыхания прочность быстро нарастает. Подобным же образом проявляет себя ПВА в бетоне.

Применяют латексы дивинилстирольные СКС-30, СКС-50, СКС-65 и СКС-65ГП, в которых отношение дивинила к стиролу составляет соответственно 70:30; 50:50; 35:65. С увеличением

содержания стирола повышаются прочность и твердость полимера и снижается его эластичность. Применяют также латексы дивинилнитрильный СКН-40 и карбосиликатный СКД-1.

Количество вводимой добавки полимерного материала устанавливают предварительными опытами. Основным фактором, определяющим влияние добавки на свойства цементно-полимерного бетона, является полимерцементное отношение. Обычно оптимальная добавка ПВА составляет 20% массы цемента. При применении латекса, чтобы не было коагуляции полимера, вводят стабилизатор (казеинат аммония, соду и др.).

Введение полимерных добавок увеличивает пластичность растворов смесей по сравнению с чисто цементными. Прочность увеличивается, если бетон выдерживается в воздушно-сухих условиях (влажность 40...50%); во влажных условиях (влажность 90...1000%) прочность снижается. Сравнение свойств обычного и цементно-полимерного раствора 1:3 приведено в табл. 14.4. В сухих условиях особенно возрастает прочность на изгиб (в 1,5...3 раза), прочность на сжатие увеличивается в меньшей степени.

Водорастворимые смолы вводятся в бетон в небольших количествах (приблизительно 2% массы цемента). Хорошие результаты получены при введении в бетон водорастворимых эпоксидных смол ДЭГ-1, ТЭГ-1 и полиамидной смолы № 89. Эти смолы, имея гидроксильную группу OH^- , характеризуются высокой адгезией к различным материалам, включая новообразование цементного камня, кварц, гранит и другие виды заполнителей. Смола № 89 полимеризуется в щелочной среде без введения инициатора. Смолы ДЭГ-1 и ТЭГ-1 вводят в воду затвердения вместе с отвердителем. Отверждение их в щелочной среде бетона происходит интенсивнее и цепи полимера обладают большой эластичностью.

Цементно-полимерные бетоны готовят по той же технологии, что и обычный цементный бетон. Наиболее целесообразно применять эти бетоны для тех конструкций и изделий, где можно использовать особенности их свойств, например для полов, дорог, отделочных составов, коррозионно-стойких покрытий.

Таблица 14.4. Прочность цементно-полимерных бетонов

Полимерцементное отношение	Прочность на сжатие, МПа		Прочность на изгиб, МПа	
	сухие образцы	влажные образцы	сухие образцы	влажные образцы
0	10,8	13,6	4,8	6,7
0,1	14,8	12,5	13,1	6
0,2	16,5	11,2	14,8	5,6
0,3	9,4	7,4	12,1	4,6

§ 14.3. ПОЛИМЕРБЕТОНЫ

● Полимербетонами называют бетоны, в которых вяжущими служат различные полимерные смолы, а заполнителями — неорганические материалы — песок и щебень. Для экономии смолы и улучшения свойств полимербетонов в них иногда вводят тонкомолотые наполнители. Для ускорения твердения и улучшения свойств применяют отвердители, пластификаторы и другие специальные добавки.

Наиболее часто для полимербетонов используют терморезактивные смолы: фурановые, эпоксидные, полиэфирные. Отверждение полимерного вяжущего осуществляется при обычной температуре, а в некоторых случаях — с подогревом.

Фурановые смолы относятся к группе соединений, в молекулярной структуре которых присутствует гетероциклический радикал («фурановое кольцо»). Фурановые смолы обычно получают конденсацией фурфурола и фурфурилового спирта с фенолами и кетонами. Эти смолы являются наиболее дешевым полимерным вяжущим. В строительстве наибольшее распространение получил мономер ФА, получаемый при взаимодействии фурфурола и ацетона в щелочной среде. При нормальной температуре это жидкость желтовато-коричневого цвета плотностью 1,082 г/см³ с температурой кипения 160...240°C, нерастворимая в воде, но растворимая в эфирах и ацетоне. Отверждение мономера ФА происходит в присутствии катализаторов (сульфокислот), в качестве которых наиболее часто используют бензосульфокислоту или контакт Петрова. Полимеризация может происходить при нормальной температуре и с подогревом. Повышение дозы катализатора позволяет отверждать полимер ФА при температуре окружающей среды около 0°C, однако прочность полимера при этом понижается. Оптимальное количество бензосульфокислоты составляет 20...30% массы ФА.

Эпоксидные смолы — это полимерные вещества линейного строения, содержащие эпоксигруппу. Для полимербетонов наиболее пригодны жидкие эпоксидные смолы ЭД-5, ЭД-6 и др. Эпоксидные смолы отверждаются с помощью катализатора ионного типа. Для холодного отверждения эпоксидных смол применяют полиэтиленполиамин (10...12% массы смолы), гексаметилендиамин (15...20%), а в последнее время также высокомолекулярные вещества, такие, как полиамиды, тиоколы, полиэфирсы. Скорость отверждения возрастает при повышении температуры. Для улучшения деформативной способности эпоксидных полимеров вводят пластификаторы. Наиболее часто используют дибутилфталат (15...20% массы смолы). Пластификаторами, являющимися одновременно отвердителями, служат низкомолекулярные полиамиды и тиоколы.

Полиэфирные смолы получают путем поликонденсации двух-

основных кислот (малеиновой, фталевой и др.) и многоатомных спиртов. В качестве вяжущих для полимербетонов обычно используют ненасыщенные полиэфирные смолы: полиэфирмалеинаты ПН-1 и ПН-3, полиэфирокрилаты МГФ-9 и ТМГФ-11, которые отверждаются при обычной температуре с помощью специальных катализаторов (перекиси бензонла, циклогексанона, метилэтилкатона и др.).

Для полимербетонов на фурановых и формальдегидных смолах применяют заполнители, стойкие в кислой среде, так как для полимеризации используют кислые отвердители. Использование известняков, доломитов, цементов и других заполнителей, имеющих щелочную реакцию, недопустимо, так как это приводит к резкому снижению прочности бетона. Для полимербетонов на полиэфирных и эпоксидных смолах можно применять самые различные заполнители, в том числе карбонатные породы, асбест и другие материалы.

Свойства полимербетонов зависят от вида смолы, состава бетона, технологии получения. В табл. 14.5 приведены усредненные характеристики полимербетонов и для сравнения характеристики цементного бетона, полученные для бетонов средних составов. Наибольшей прочностью обладают бетоны на эпоксидной смоле, в том числе с прочностью на растяжение, которая достигает 12 МПа. Для этих бетонов характерны также хорошая химическая стойкость, водостойкость, стойкость к истиранию, высокая клеящая способность. Однако стоимость бетонов на эпоксидных смо-

Таблица 14.5. Усредненные характеристики полимербетонов

Наименование показателей	Портланд-цемент	Вяжущее (смола)			
		фенольное	фурановое	полиэфирное ПН-1	эпоксидное ЭД-6
Прочность на сжатие, МПа	30	20	50	80	100
Усадка линейная, %	0,001	—	0,5	1,5	0,2
Мера ползучести, см ² /кг	0,2	—	0,5	0,4	0,3
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$	10	30	30	30	30
Пористость, %	20	2	2	1	1
Объемное омическое сопротивление, Ом·см	10	10	10	10	10
Стойкость к нагреву, °C	200	160	180	100	120
Стойкость, баллы (по десятибалльной шкале):					
к старению	10	4	4	5	6
к воде	10	8	7	6	8
к щелочам	9	2	8	2	10
к кислотам	1	8	10	8	6
Цвет	Светло-серый	Черный	Черный	Разный	Разный
Ориентировочная стоимость, руб/м ³	30	130	160	300	500

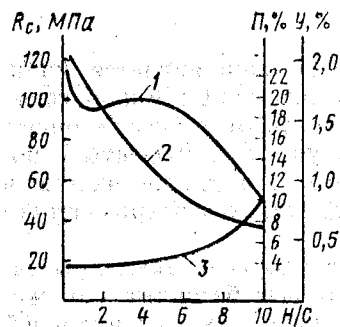


Рис. 14.2. Влияние соотношения между наполнителем и смолой Н/С на прочность 1, усадку 2 и пористость 3 по данным Н. А. Мощанского

наполнитель: смола на свойства бетона показано на рис. 14.2. Очень важно, что введение наполнителя позволяет снизить усадку, ползучесть и температурные деформации полимербетона, обеспечивает получение качественных железобетонных изделий и конструкций. Уменьшению этих показателей способствует также понижение расхода смолы в бетоне.

Подбор состава полимербетона проводят методом абсолютных объемов. Вначале опытным путем подбирают наиболее плотную смесь заполнителей, затем рассчитывают количество микронаполнителя (различных молотых горных пород), которое должно быть равно объему пустот в заполнителе с избытком около 10%. После этого определяют расход смолы и отвердителя. Если смола заполнит только пустоты микронаполнителя, то смесь будет жесткой, недостаточно удобообрабатываемой, поэтому расход смолы подбирают обычно опытным путем, чтобы получить заданную подвижность бетонной смеси. Обычно расход смолы равен объему пустот в микронаполнителе плюс дополнительное количество (10...20%) от этого объема. Слишком большое количество смолы применять не следует, так как это увеличивает усадку бетона, температурные деформации и снижает прочность бетона. Количество отвердителя устанавливают опытным путем. Для разных смол и условий твердения оно может колебаться в заметных пределах. Полученный состав бетона проверяют опытным путем.

Наиболее целесообразно использовать полимербетоны в тех конструкциях, где полнее проявятся их положительные свойства, например в коррозионно-стойких конструкциях химических производств, конструкциях, испытывающих сильное истирающее воздействие (водосливы гидротехнических сооружений, некоторые трубопроводы), и других специальных конструкциях и изделиях.

лах очень высока. На строительстве наибольшее распространение пока получили полимербетоны на фурановых смолах.

Расход смолы в полимербетоне зависит от свойств заполнителя. Чем больше пустотность заполнителя, выше содержание в нем мелких фракций и больше их удельная поверхность, тем больше расход смолы и отвердителя, поэтому для полимербетонов большое значение имеет правильный подбор состава минеральной части. В ряде случаев расход смолы может быть уменьшен, а свойства бетона улучшены за счет применения тонкомолотых наполнителей (графита, андезита и др.). Влияние соотношения

§ 14.4. БЕТОНОПОЛИМЕРЫ

Существенным недостатком обычных бетонов является наличие разветвленной сети пор, капилляров, различных микродефектов, образующихся при формировании бетонных и железобетонных изделий, их твердении и в процессе эксплуатации. Дефекты и поры понижают прочность бетона, а также его долговечность и стойкость к воздействию агрессивных сред, так как открывают последним доступ внутрь бетона.

Свойства бетона можно изменить, если поры и капилляры заполнить другим веществом. Для этого готовые бетонные или железобетонные изделия или конструкции подвергают специальной обработке. Эта обработка включает сушку изделий, вакуумирование, пропитку специальным составом и полимеризацию при пропитке мономерами. Окончательные свойства материала будут зависеть как от свойств обрабатываемого бетона и используемого для заполнения пор вещества или состава, так и от технологии обработки.

Сушка бетона проводится с целью освободить от воды поры и капилляры материала и лучше подготовить их для заполнения специальным составом. Вакуумирование обеспечивает более глубокую очистку пор и капилляров, а также удаляет из бетона воздух, который отрицательно влияет на полимеризацию некоторых мономеров. Вакуумирование является желательной, но не всегда обязательной операцией. В некоторых случаях необходимые результаты достигаются и без вакуумирования.

Для пропитки используются самые различные вещества и материалы. Если необходимо только закрыть доступ внутрь бетона воде и агрессивным жидкостям и газам, то используют материалы типа петролатума, разбавленных смол серы, битума и битумов, модифицированных синтетическими смолами. Многие из этих материалов не требуют последующей обработки, и изделие оказывается готовым к употреблению непосредственно или вскоре после обработки. Для более значительного изменения структуры и свойств бетона используют жидкие мономеры (метилметакрилат или стирол), полимеры (эпоксидные и полиэфирные смолы) и различные композиции на их основе.

Глубина пропитки зависит от свойств пропитываемого состава, в частности от его вязкости, и угла смачивания им бетона. Вязкие вещества, например битумы или петролатум, пропитывают бетон на глубину всего 1...3 см. Жидкие мономеры, например стирол или метилметакрилат, могут за сравнительно короткое время пропитывать бетон на глубину 10...20 см и более. Чем глубже пропитка, тем больше времени требуется на ее осуществление. Количество мономера, потребное для пропитки бетона, зависит от его пористости. Для полной пропитки плотного бетона требуется мономера 2...5% по массе (4...10% по объему), раст-

вора — на 30...70% больше, чем для бетона, легкие пористые бетоны могут впитать до 30...60% мономера.

Многие мономеры являются дефицитными и дорогими материалами, поэтому для экономичного расходования их необходимо правильно подготовить бетон до пропитки. Возможно также применять частичную пропитку наиболее важных участков, например поверхностных слоев, мест расположения высокопрочной арматуры, наиболее напряженных мест. В некоторых особых случаях применяют обработку бетона газом, который вследствие сложных физико-химических процессов превращается в твердое вещество, заполняющее поры бетона. Разновидностью такого процесса является ократирование.

При применении жидких мономеров требуется их полимеризация непосредственно в теле бетона. Полимеризацию осуществляют различными способами в соответствии с природой мономера. Наиболее распространен термokatалитический способ.

При термokatалитическом способе в мономер перед использованием его для пропитки вводят специальные вещества — инициаторы полимеризации. После пропитки бетона изделие или конструкцию нагревают до 70...120°C (в зависимости от вида мономера) и через несколько часов жидкий мономер превращается в твердый полимер, плотно заполняя и как бы заклеивая все поры и дефекты бетона.

При радиационной обработке полимеризация мономера протекает при нормальных температурах. В очень массивных изделиях или бетонах, впитывающих большое количество мономера, возможно некоторое повышение температуры за счет теплоты, выделяющейся при реакции полимеризации.

Многие жидкие мономеры, в частности стирол и метилметакрилат, являются легкоиспаряющимися веществами, поэтому процесс специальной обработки надо проводить таким образом, чтобы предотвратить испарение мономера из изделия или по возможности уменьшить потери мономера. Для этого обработку проводят в закрытых контейнерах, заворачивая или покрывая изделия непроницаемыми пленками, погружая в специальные жидкости.

● *В результате обработки либо достигают увеличения долговечности и непроницаемости бетона, если его пропитывают вязкими составами без их последующей полимеризации и упрочнения, например битумами, либо получают новые материалы, по свойствам значительно превосходящие бетоны, если его пропитывают мономером с последующей его полимеризацией в теле бетона. Подобные материалы получили название бетонополимеров. Свойства бетонополимеров зависят как от свойств бетона и полимера, так и от технологии обработки. Чем прочнее полимер, используемый для пропитки, и больше его содержание в бетонополимере и чем прочнее бетонный каменный скелет, тем выше прочность бетонополимера, которая может достигать 200 МПа и более.*

Прочность бетонополимера вследствие особенностей его структуры выше прочности использованного бетона и полимера:

В бетонополимере удается с помощью небольших количеств полимера достигнуть резкого (в несколько раз) увеличения прочности и улучшения других свойств исходного бетона, что делает бетонополимеры перспективным материалом для специальных строительных конструкций. Для достижения наилучших результатов при производстве бетонополимерных изделий и конструкций к бетону как полуфабрикату, подвергающемуся последующей обработке, предъявляются особые требования, из которых определяющим для получения наибольшего эффекта является характер пористости бетона.

При пропитке бетона конфигурация его пор и капилляров определяет скорость пропитки и возможное предельное насыщение бетона мономером. Высота подъема жидкости обратно пропорциональна радиусу капилляра, а скорость движения жидкости прямо пропорциональна квадрату радиуса и обратно пропорциональна вязкости жидкости. Для успешного протекания полимеризации необходимо, чтобы мономер прочно удерживался в капилляре. Вместе с тем при полимеризации мономер обычно стремится уменьшиться в объеме до 10...20% и поэтому только в тонких капиллярах с шероховатыми стенками будет удерживаться достаточно прочно и полимеризоваться в условиях предварительного напряжения, что обеспечивает соответствующую ориентацию молекул и некоторое улучшение свойств полимера.

При нагружении полимер работает как дисперсная арматура: чем лучше его сцепление с бетоном, тоньше нить полимера, больше таких нитей приходится на единицу площади бетонополимера, тем сильнее влияние полимера на свойства материала. Таким образом, по условиям полимеризации и работы под нагрузкой желательно иметь более тонкие капилляры в бетоне. При этом приходится проводить более длительную пропитку подобных материалов.

Оптимальные размеры капилляров бетона зависят также от свойств пропиточного состава. При его высокой вязкости тонкие капилляры могут вообще не заполняться мономером, что необходимо учитывать при проектировании состава бетона. При очень жидких мономерах, наоборот, они будут плохо удерживаться в толстых капиллярах, что вводит ограничения по верхнему пределу желательного радиуса капилляра. Следовательно, имеется определенное оптимальное распределение капилляров и каналов в бетоне, при котором достигается их наиболее полное заполнение мономером и его удержание в процессе последующей обработки.

В бетоне могут встречаться капилляры различного вида. Условно их можно свести к линейным капиллярам, в том числе с различной геометрией сечения (в виде круга, сектора, щели и т. д.), и к капиллярам с уширениями. Желательно, чтобы боль-

шинство капилляров были линейными. Уширение на капилляре ведет к перерасходу мономера. Чем больше в системе капилляров уширений и больше их размеры по сравнению с размерами капилляров, тем выше расход нерационально используемого мономера.

Глубина пропитки бетона мономером зависит от структуры бетона, вязкости мономера, температуры пропитки и ряда других факторов. Скорость и глубина пропитки бетона различными органическими веществами показаны на рис. 14.3. Если максимальная глубина пропитки бетона h_{\max} установлена опытным путем, то глубина пропитки h за время t может быть ориентировочно определена по формуле

$$h = h_{\max} \left(1 - h^{-\frac{\alpha p_0 t}{x}} \right), \quad (14.14)$$

где α — коэффициент проницаемости; p_0 — давление при пропитке; x — половина толщины пластины, куба или радиус цилиндра, n — коэффициент, $n=2$ для пластины и цилиндра и $n=3$ для шара.

При пропитке бетона мономером с последующей полимеризацией его в теле бетона в материале возникает особая структура, которая состоит из затвердевшего цементного камня, скрепляющего зерна заполнителя в единый монолит, и разветвленной системы нитей и включений полимера.

Полимер заполняет поры и капилляры цементного камня, заполнителя и контактной зоны между ними, делая их газо- и водонепроницаемыми. Полимер полностью заполняет мелкие поры, в крупных порах вследствие усадки мономера при полимеризации могут возникать усадочные раковины и пустоты в центре поры, однако эти пустоты являются замкнутыми, а поры — не проницаемыми для жидкости и газов. Полимер в отдельных порах связан между собой тончайшими нитями, проходящими через капилляры цементного камня. Образование пустот в центре крупных пор объясняется также тем, что капилляры, окружающие пору, при полимеризации отсасывают мономер из крупных пор.

В большинстве случаев полимер не взаимодействует с цементным камнем, однако отдельные полимеры могут вступать в физи-

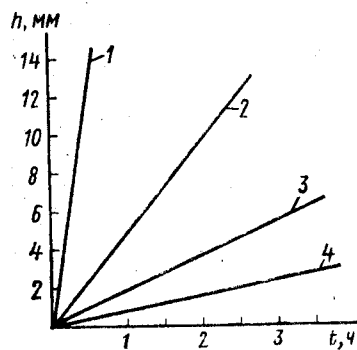


Рис. 14.3. Глубина пропитки h раствора 1:2 при $V/C=0,5$ различными органическими веществами:

1 — метилметакрилатом; 2 — полиэфиром; 3 — петролатумом; 4 — жидким битумом

ко-химическое взаимодействие с компонентами бетона. Обычно полимер как бы заклеивает дефекты структуры цементного камня, заполнителя и контактной зоны и связывает тысячами нитей различные участки бетона, повышая их сопротивление нагрузке и трещиностойкость.

Образующуюся в бетоне сетку полимера можно рассматривать как особого рода дисперсное армирование. При полимеризации мономер стремится сократиться в объеме, что вызывает обжатие в минеральной части материала. В результате создается разнородность предварительно напряженного состояния материала, что также способствует повышению его прочности и трещиностойкости. Это явление подтверждают результаты деформаций бетона в процессе его специальной обработки и в последующий период. Во время обработки наблюдаются деформации усадки, а в последующем — деформации расширения, обусловленные релаксацией полимера.

Специальная обработка бетона полимером способствует значительному повышению прочности сцепления между заполнителем и цементным камнем. Полимер склеивает все дефекты контакта и в ряде случаев, проникая в раствор и заполнитель, например известняковый, как бы связывает их своими нитями воедино. В результате прочность сцепления цементного раствора с гранитом и известняком повышается с 1...2 МПа в обычном бетоне до 8...9 МПа в бетонополимере.

Специальная обработка повышает также адгезию цементного камня к стальной арматуре или волокнам дисперсной арматуры и соответственно улучшает совместную работу арматуры и бетонополимера. Разрушение часто наступает не по зоне контакта арматуры с бетонополимером, а на некотором расстоянии от нее. В результате возрастает прочность и трещиностойкость армированных бетонополимеров.

При поверхностной обработке материала структура бетонополимера и соответствующее изменение свойств материала наблюдаются только в поверхностных слоях. Внутри массива бетон сохраняет свою структуру и свойства. Пропитка бетона мономером с его последующей полимеризацией в теле бетона приводит к резкому увеличению прочности и улучшению других свойств бетона. Прочность бетонополимера на сжатие по сравнению с исходным контрольным бетоном повышается в 2...10 раз, вместо бетона прочностью 20...50 МПа получают бетонополимер прочностью 80...200 МПа. Прочность бетонополимера на сжатие зависит от прочности исходного материала, свойств полимера, содержания его в бетоне. С увеличением содержания полимера в бетоне прочность бетонополимера возрастает (рис. 14.4).

Степень насыщения бетона мономером зависит от подготовки бетона к пропитке. Чем суше бетон, тем больше мономера заполнит его поры и капилляры и тем большей будет прочность бетоно-

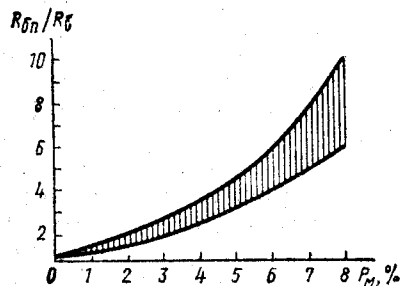


Рис. 14.4. Зависимость прочности бетонополимера от содержания полимера

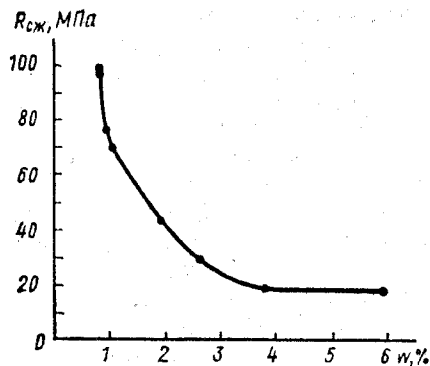


Рис. 14.5. Зависимость прочности бетонополимера от влажности бетона в момент начала пропитки мономером

полимера (рис. 14.5). Прочность бетонополимера на растяжение по сравнению с исходным бетоном увеличивается в 3...10 раз, достигая 18 МПа. Соответственно возрастает прочность бетонополимера на изгиб.

На прочность бетонополимера, хотя и в меньшей мере, чем на прочность обычного бетона, оказывают влияние технологические факторы. С понижением прочности бетона увеличивается его пористость и при пропитке такого бетона повышается содержание полимера. Это приводит к тому, что прочность менее прочных бетонов при обработке возрастает в большей степени, чем более прочных, хотя разница в прочности получающихся бетонополимеров не очень велика (табл. 14.6). Степень повышения прочности бетона оценивается коэффициентом упрочнения, который представляет собой отношение прочности бетонополимера к прочности исходного бетона.

Вид плотного щебня не оказывает существенного влияния на прочность бетонополимера. Однако в бетонополимере щебень является слабым элементом, поэтому высокие прочности показывают мелкозернистые бетонополимеры, требующие, однако, вследствие

Таблица 14.6. Влияние начальной прочности бетона на прочность бетонополимера

Прочность бетона до обработки, МПа	Содержание полимера в бетоне, %	Прочность бетонополимера, МПа	Коэффициент упрочнения
40	5	110	2,75
30	5,5	120	4
20	6	130	6,5

повышенной пористости несколько большего расхода полимера. Получены мелкозернистые бетонополимеры с прочностью 150...210 МПа, что позволяет создавать эффективные тонкостенные конструкции.

Полимеры являются материалами, прочность которых при нагреве выше 110...200°C начинает уменьшаться. Естественно, это сказывается на прочности бетонополимера. В интервале 0...100°C прочность бетонополимера почти не изменяется, с повышением температуры выше 100°C его прочность начинает уменьшаться. Для получения бетонополимера, сохраняющего свои свойства при более высоких температурах (до 200...250°C), для пропитки следует применять специальные термостойкие композиции. При остывании бетонополимера ниже 0°C его прочность увеличивается. Это обусловлено как повышением прочности полимера при уменьшении температуры, так и тем, что полимер имеет больший температурный коэффициент линейного расширения, чем бетон, и при остывании, сжимаясь, как бы обжимает минеральный скелет, помогая ему работать под нагрузкой.

Последующая обработка бетона полимером позволяет регулировать деформативность бетона, существенно улучшает долговечность, износостойкость и другие его свойства. Значительно возрастает стойкость материала в агрессивных средах. В табл. 14.7 приведены средние результаты из многих опытов, наглядно показывающие положительное влияние обработки бетона полимером на его свойства.

Таблица 14.7. Свойства бетонов и бетонополимеров

Наименование	Бетонополимер	Исходный бетон
Предел прочности, МПа, при:		
сжатии	100 ... 200	30 ... 50
растяжении	6 ... 19	2 ... 3
изгибе	14 ... 28	5 ... 6
Модуль упругости при сжатии, МПа	$3,5 \cdot 10^4$... $5 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$... $3,5 \cdot 10^4$
Предельная деформация при сжатии	0,002	0,001
Прочность сцепления с арматурой, МПа	10 ... 18	1 ... 2
Деформация усадки	0 ... $5 \cdot 10^{-5}$	$50 \cdot 10^{-5}$
Деформация ползучести	$6 \cdot 10^{-5}$... $8 \cdot 10^{-5}$	$40 \cdot 10^{-5}$... $60 \cdot 10^{-5}$
Электрическое сопротивление, Ом	10^{14}	10^5
Водопоглощение, %	1	3 ... 5
Морозостойкость, стандартные циклы	5000	200
Коррозионная стойкость к сульфатам и кислотам	Высокая	Недостаточная

Таблица 14.8. Улучшение свойств бетонов после обработки полимерами

Наименование	Прочность на сжатие, МПа	
	до обработки	после обработки
Обычный бетон	10 ... 40	80 ... 150
Высокопрочный бетон	50 ... 70	150 ... 200
Керамзитобетон	3 ... 15	30 ... 90
Газобетон	1 ... 8	15 ... 90
Гипсобетон	15 ... 22	80 ... 92
Арболит	9	48
Силикатный бетон	30 ... 50	100 ... 200
Гипсоцементобетон	30	140

Полимер — дорогостоящая составляющая бетонополимера, поэтому наиболее пригодны для пропитки те составы, в которых каждый процент введенного полимера обеспечивает максимальное повышение прочности. Это свойство материала можно ориентировочно оценить с помощью коэффициента эффективности

$$k_{эф} = \Delta R / P = (R_{6п} - R_6) / P, \quad (14.15)$$

где ΔR — прирост прочности, полученной вследствие пропитки бетона мономером с его последующей полимеризацией, МПа; P — содержание полимера в бетонополимере, %.

В тяжелом бетонополимере $k_{эф} = 10 \dots 20$ МПа/%, т. е. каждый процент полимера повышает прочность бетона на $10 \dots 20$ МПа (в обычном бетоне для этого требуется около 100 кг цемента).

Специальная обработка бетона полимером приводит к стабилизации его структуры и тем самым открывает новые возможности в совершенствовании технологии бетона. В бетон можно вводить повышенное количество химических добавок для более эффективного воздействия на его свойства, например применять для ускорения твердения до 5% $CaCl_2$, так как плотная структура бетонополимера надежно защищает арматуру от коррозии.

Для экономии цемента в этом случае эффективно использование золы и тонкомолотых отходов камнедробления. Замена до 50% цемента золой мало влияет на прочность бетонополимера. Зола имеет большое количество тонких капилляров и обеспечивает создание более дисперсной и вместе с тем более связанной, лучше пронизывающей все тело бетона сетки полимерных нитей, что способствует получению прочных и особо плотных бетонополимеров. Бетонополимеры с золой имеют прочность $140 \dots 160$ МПа. Путем обработки полимером различных видов бетона можно получить самые разнообразные бетонополимеры (табл. 14.8).

В первую очередь целесообразно производить специальную обработку полимером для повышения долговечности изделий, работающих в суровых климатических или агрессивных условиях, а

также для получения изделий с особыми свойствами (износостойких, электроизоляционных, электропроводных, декоративных, газонепроницаемых и др.). Широко используют пропитку полимерными составами при ремонте и восстановлении бетонных и железобетонных изделий.

§ 14.5. ФИБРОБЕТОН

● *Фибробетон* — это бетон, армированный дисперсными волокнами (фибрами). Фибробетон обладает повышенной трещиностойкостью, прочностью на растяжение, ударной вязкостью, сопротивлением истираемости. Изделия из этого бетона можно изготавливать без армирования специальными сетками и каркасами, что упрощает технологию приготовления изделия и снижает ее трудоемкость.

Для армирования бетона применяют различные *металлические и неметаллические волокна*. В качестве фибр обычно применяют тонкую проволоку диаметром $0,1 \dots 0,5$ мм, наружную на отрезки $10 \dots 50$ мм. Лучшие результаты обеспечивают фибры диаметром $0,3$ мм и длиной 25 мм. При повышении диаметра фибры выше $0,6$ мм резко уменьшается эффективность влияния дисперсного армирования на прочность бетона.

Из неметаллических волокон могут применяться *стеклянные волокна, базальтовые, асбестовые* и др. Стекловолоконные волокна обычно имеют диаметр порядка нескольких десятков микрометров и длину $20 \dots 40$ мм. Они обладают высокой прочностью на растяжение ($1500 \dots 3000$ МПа) и модуль деформации выше, чем у цементного камня. Температурный коэффициент линейного расширения стекловолокна близок к такому коэффициенту цементного камня. Однако стекло быстро разрушается под действием щелочной среды цемента, поэтому необходимо предусматривать применение вяжущих веществ или специальных мероприятий, предохраняющих разрушение стеклянных волокон в бетоне от коррозии. К этим мероприятиям можно отнести использование в бетоне глиноземистого цемента, добавки в бетон, связывающие щелочи, пропитку бетона полимером.

Для армирования цементного камня хорошо известны и широко применяются *асбестовые волокна*. Этими волокнами армируют изделия, изготавливаемые в заводских условиях по специальной технологии. Асбестовые волокна обладают рядом ценных свойств: высокой прочностью и огнестойкостью, стойкостью к агрессивным воздействиям щелочей, долговечностью. Материалы, армированные асбестовыми волокнами, получили название асбестоцемента.

Для армирования ячеистых бетонов, гипсобетонов и других материалов с низким модулем упругости используют *полимерные волокна*. Модуль упругости их меньше, чем у цементного камня,

а температурный коэффициент линейного расширения в 3...9 раз выше. Многие из этих волокон недостаточно хорошо сцепляются с цементным камнем, что вынуждает применять специальные фибры периодического профиля или наносить на волокна покрытие. В качестве полимерных материалов используют полиэфир, полиакрилаты, полипропилен и т. д. Прочность этих материалов составляет 60...100 МПа. Полимерные волокна используются также для тонкостенных изделий, подвергающихся ударам или эксплуатирующихся в условиях, в которых стальные волокна быстро разрушаются от коррозии.

Стальными или неметаллическими волокнами армируют, как правило, мелкозернистые бетоны, иногда цементный камень. Эффективность применения волокон в бетоне зависит от их содержания и расстояния между отдельными волокнами. Дисперсное армирование обычно достаточно эффективно приостанавливает развитие волосяных трещин лишь при расстоянии между различными волокнами не более 10 мм, поэтому применение в бетоне крупного заполнителя, не позволяющего расположить дисперсные волокна достаточно близко друг к другу, снижает эффективность подобного армирования.

Эффективность влияния различных видов волокон на свойства бетона зависит от соотношения модулей упругости армирующих волокон и бетона. При отношении $E_b/E_6 > 1$ возможно получение фибробетонов с повышенной прочностью на растяжение и трещиностойкостью. При $E_b/E_6 < 1$ повышаются ударная прочность и сопротивление материала истираемости.

Стальные фибры вводят в бетонную смесь обычно в количестве 1...2,5% объема бетона (3...9% по массе, что составляет 70...200 кг фибры на 1 м³ смеси). В этом случае повышаются прочность бетона на растяжение на 10...30%, сопротивляемость бетона ударам и его предел усталости и износостойкость.

Стекланные волокна вводят в бетонную смесь в количестве 1...4% объема бетона. Они, как и стальные волокна, обладая высоким модулем упругости, обеспечивают повышение прочности бетона на растяжение и его трещиностойкость.

При армировании бетона дисперсными волокнами его разрушение происходит не сразу, а постепенно. В начале в бетоне образуются микротрещины, число которых постепенно увеличивается. Образование сплошной трещины происходит при более значительной величине деформаций, чем в обычном бетоне. Фибра как бы поддерживает бетон, помогает ему сопротивляться растягивающим напряжениям. При воздействии на бетон механических или тепловых ударов (пожар) бетон долгое время обеспечивает защиту арматуры или более глубоких слоев и не выкрашивается с поверхности. Подобный характер поведения бетона при нагружении способствует повышению надежности работы дисперсно-армированных изделий в особых случаях эксплуатации.

Введение волокон в бетонную смесь понижает ее подвижность и вызывает определенные трудности в приготовлении смеси цемента, воды, заполнителя и фибр. Обычно приходится несколько увеличивать количество воды в подобных смесях и содержание мельчайших частиц (цемента и мелкого заполнителя). Как правило, расход цемента составляет 400...500 кг/м³.

Введение волокон в замес — важная операция, так как бетонная смесь с фибрами склонна к комкованию, а фибры могут образовывать в бетонной смеси «ежи», что резко ухудшает ее качество и не позволяет добиться надлежащего уплотнения материала в изделии, поэтому для приготовления смеси используют различные приемы: вводят фибры в последнюю очередь в предварительно перемешанную смесь цемента, воды и заполнителя или смешивают сначала заполнители и волокна, а затем добавляют цемент и воду. Иногда для приготовления смесей используют особые виды смесителей, например смесители с дополнительным пульсирующим воздействием на смесь, которое способствует разрушению комков и «ежей». Для изготовления некоторых конструкций используют одновременный набрызг волокна и мелкозернистой бетонной смеси. Это оказывается полезным при применении хрупких неметаллических волокон.

Дисперсная арматура в бетоне достаточно хорошо защищена от коррозии плотным цементным камнем, однако в некоторых случаях, особенно когда возможно воздействие на фибробетон агрессивных сред, стальные фибры защищают специальными покрытиями, которые обычно не только повышают стойкость фибровой арматуры к коррозии, но и способствуют улучшению сцепления между фибрами и бетоном и тем самым на 20...40% улучшают прочность бетона на растяжение и его трещиностойкость.

§ 14.6. ДЕКОРАТИВНЫЙ БЕТОН

● *Декоративный бетон готовят, используя белые и цветные цементы и специальные заполнители.* В зависимости от состава и назначения декоративные бетоны можно подразделить на цветные бетоны и бетоны, имитирующие природные камни или сами по себе обладающие особо выразительной структурой. При необходимости поверхность бетона подвергают специальной обработке, чтобы получить ее выразительную декоративную фактуру. Пластичность бетонной смеси позволяет придавать бетонным изделиям различную конфигурацию, формировать изделия с рельефной поверхностью, изготавливать различные декоративные элементы зданий и сооружений.

Для получения цветных бетонов применяют белые, цветные и различные минеральные или органические пигменты. Для осветления белого цемента (при необходимости получить особо светлые бетоны) в него вводят двуоксид титана (1...2% массы це-

мента). Пигменты, используемые в цветных бетонах, должны обладать высокой свето-, атмосферо- и щелочестойкостью. Наиболее часто используют минеральные пигменты, которые в большинстве своем являются оксидами или солями различных металлов. Эти пигменты вводят в количестве 1...5% массы цемента в зависимости от их укрывистости, плотности и других свойств. Пигменты позволяют получить широкую гамму цветов: от красного (оксид железа) и зеленого (оксид хрома) до фиолетового (оксид марганца) и черного (перекись марганца). К белым пигментам относятся мел или известняк, к черным — сажа, к желтым — охра, представляющая собой смесь белой глины (каолина) с оксидом железа. Применяя смешанные пигменты, можно получить бетоны разной расцветки.

В последнее время появились различные органические пигменты и красители (анилиновые и др.), которые дают интенсивное окрашивание бетона при введении их в количестве всего 0,1...0,2% массы цемента и отличаются высокой свето- и щелочестойкостью.

Для получения достаточной плотности и хорошей цветовой выразительности поверхности бетона по сравнению с обычным бетоном несколько повышают расход цемента. При крупности заполнителя до 10 мм расход цемента составляет 450...500 кг/м³. В качестве цветных бетонов широко используют мелкозернистые бетоны. Оптимальными с точки зрения получения хороших декоративных качеств являются составы 1:2...1:3 при В/Ц_{цет}, соответствующие нормальной густоте цементного теста.

Расход воды в цветных бетонах определяют предварительными испытаниями и затем постоянно контролируют, так как даже небольшие отклонения в расходе воды влекут за собой заметные изменения цвета бетона. Для формования изделий из цветных бетонов используют пластичные достаточно жирные бетонные смеси, которые хорошо формируются и менее подвержены расслоению.

Для сокращения расхода воды и цемента и повышения долговечности изделий используют пластификаторы и суперпластификаторы, а также комплексные добавки на их основе. Для повышения долговечности материала и борьбы с высоломи, которые могут появляться на поверхности цветных бетонов в период их эксплуатации в результате сложных физико-химических процессов и воздействия попеременного увлажнения и высыхания, применяют гидрофобизаторы, тонкомолотые добавки, способствующие связыванию гидрата оксида кальция, выделяющегося при твердении цемента, или пропитывают цветные бетоны полимерами. Для получения равномерной окраски бетона используют специальные добавки-выравниватели (ОП-7 и др.).

Хорошие результаты получают, применяя заранее приготовленные в смесителях цветные смеси, в которые входят пигменты, часть воды затворения и добавки. В последнее время для приготовления подобных смесей используют ротационно-пульсационные

аппараты, в которых смесь подвергают динамическому воздействию, способствующему получению весьма диспергированных частиц, и высокой гомогенизации смеси. При необходимости бетонирования тонких конструкций значительных размеров с целью предотвращения образования усадочных трещин в бетоны могут вводиться специальные комплексы добавок, обеспечивающие получение малоусадочных бетонов.

В цветных бетонах используют чистые кварцевые пески желательного светлых оттенков без примеси частиц из оксидов железа, которые окрашивают пески и бетоны в серый цвет. В качестве крупных заполнителей могут применяться светлый известняк и доломит. Широко используют также отходы камнедробления, дробленые пески и щебень из мрамора, высевки гранита, туфа и др. Крупный заполнитель обычно не придает особого цвета бетону. На цвет бетона влияют мелкие частицы заполнителя, размер которых не превышает 0,3 мм. Чтобы уменьшить расслоение цветного бетона и добиться равномерности окраски, используют воздухововлекающие добавки, а также вводят в небольших количествах тонкие фракции некоторых материалов: жирной извести, тонкомолотого известняка и др.

Бетонную смесь предохраняют от загрязнения при приготовлении, транспортировании и укладке в формы. Продолжительность перемешивания смесей для цветных бетонов обычно несколько больше, чем обычных. Формы для изготовления изделий из цветных бетонов должны быть химически нейтральными, жесткими, чистыми и водонепроницаемыми. Чаще всего применяют стальные формы или пластиковые, позволяющие получать изделия с высокой сложностью рельефа.

При формовании изделий используют глубинное вибрирование, обеспечивающее хорошее заполнение форм даже сложной конфигурации и способствующее получению гладких лицевых поверхностей, так как при глубинном вибрировании уменьшается воздухововлечение в бетонную смесь на границе бетона и формы. Для изготовления изделий используют также ударное формование и низкочастотную вибрацию. В ряде случаев в формы устанавливают специальные вкладыши из нержавеющей стали, полимерных материалов, обеспечивающих получение рельефа и высокого качества лицевой поверхности изделия. При бетонировании изделия из цветных бетонов необходимо применять специальные смазки, например на основе парафина или воска, которые не загрязняют лицевую поверхность бетона.

При тепловой обработке может происходить некоторое изменение цвета пигментов, что необходимо учитывать при подборе состава краски. При хранении на складе и при транспортировке готовых изделий необходимо защищать их поверхность от загрязнения и ударов, которые могут привести к ее повреждению. В некоторых случаях изделия из цветных бетонов покрывают пленкой

или используют при перевозке специальные контейнеры и способы крепления, гарантирующие сохранность лицевых поверхностей изделий. При армировании изделий из цветных бетонов арматура должна устанавливаться на глубине более 2 см от поверхности бетона, чтобы в период эксплуатации избежать появления ржавчины вследствие коррозии арматуры.

Для повышения художественной выразительности декоративных бетонов применяют специальные приемы, позволяющие обнажить заполнитель и выявить структуру бетона. В этом случае декоративный бетон может имитировать различные породы отделочных камней или иметь оригинальную декоративную фактуру. Для получения декоративного бетона в этом случае помимо применения белого цемента, пигментов и добавок используют мелкий и крупный заполнители, обеспечивающие получение необходимой структуры материала. В качестве заполнителя в этом случае могут использоваться дробленый мрамор, гранит, базальт, слюды, дробленое цветное стекло и другие подобные материалы.

Для выявления структуры бетона его поверхность подвергают специальной обработке — шлифовке и полировке. Поверхность бетона обрабатывают также бучардой или пневматическим молотком, с помощью пескоструйного аппарата; для обнажения заполнителей используют специальные замедлители твердения. При шлифовке для бетона применяют обычно легкополирующиеся заполнители, например мрамор. При обработке бучардой снимается слой бетона толщиной 0,5...1 см, в этом случае увеличивают защитный слой бетона над арматурой.

В строительстве широко применяют изделия со вскрытой структурой заполнителя, например гранитного щебня, которую получают, нанося на поверхность бетона или формы специальные составы (из декстрина, буры и т. д.), проникающие в поверхностные слои бетона и замедляющие твердение цементного камня. В результате поверхностный слой цементного камня является очень слабым и легко удаляется с помощью воздействия водяной струи под высоким давлением, обработки жесткими щетками или пескоструйной обработки.

Изделия из декоративного бетона должны сохранять свои свойства в течение длительного времени. Для этого могут применяться специальные способы консервации поверхности, например флюатирование, гидрофобизация, пропитка полимером. Подобная обработка повышает стойкость бетона и обеспечивает сохранение внешнего вида его поверхности в течение длительного времени без специального ухода.

Декоративные бетоны могут применяться для самых различных строительных конструкций: ограждающих конструкций общественных и жилых зданий, декоративных плит для наружных и внутренних стен зданий, для лестничных маршей, элементов фасада, в деталях малых архитектурных форм, для барельефов и скульптур,

для изделий специального назначения. Иногда детали из декоративного бетона сочетают с другими материалами: камнем, эмалированной сталью, пластиком.

При изготовлении изделий с использованием цветных и декоративных бетонов часто применяют слоистые конструкции, в которых верхний лицевой слой выполняется из цветного или декоративного бетона, а основные несущие слои конструкции — из обычного бетона. Это позволяет сократить расход цветных и декоративных бетонов при изготовлении ограждающих конструкций зданий, облицовочных и тротуарных плит и др.

Широкое применение декоративных бетонов предусматривается в перспективных планах развития сборных железобетонных изделий и конструкций.

§ 14.7. БЕТОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

● Для приготовления бетонов использование вторичного сырья промышленности, в частности шлаков и зол, дает большой экономический эффект. По данным ВНИИСтрома, использование только 40% шлаков и зол для производства строительных материалов и изделий может дать годовой экономический эффект более 400 млн. руб.

Шлаки, получаемые в качестве вторичного продукта при выплавке чугуна и в ряде других металлургических процессов, в зависимости от своего состава подразделяют на основные и кислые. Шлаки, богатые глиноземом ($M_o > 0,65$), используют при производстве цементов. Шлаки также могут применяться в виде тонкомолотой добавки в бетоны (для сокращения расхода цемента) и в качестве мелкого и крупного заполнителя. Из вспученных шлаков получают легкий заполнитель — термозит, который используют для различных видов легкого бетона.

При измельчении доменного гранулированного шлака и затворении его растворами соединений металлов (натрия и калия) получают шлакощелочное вяжущее, которое можно применять для приготовления различных бетонов. Количество щелочного компонента составляет 5...6% массы шлака. Для затворения молотого шлака используют водные растворы щелочных компонентов 15...20%-ной концентрации по массе. В качестве щелочных компонентов применяют соду кальцинированную, поташ, растворимый силикат натрия (с силикатным модулем < 2), едкий натр и едкое кали, а также отходы производств, содержащие соединения щелочных металлов или их смеси. Шлакощелочное вяжущее имеет марки 400, 500, 600. Начало схватывания — не ранее 45 мин, конец — не позднее чем через 12 ч от начала затворения.

Назначение состава бетона на основе шлакощелочного вяжущего производится в соответствии с рассмотренной выше методикой

на основе предварительного подбора состава бетона с последующим уточнением пробными замесами. Минимальный расход шлакощелочного вяжущего для бетонов на крупном заполнителе составляет 300 кг/м^3 , для мелкозернистого бетона — 400 кг/м^3 . Приготовление и укладка бетона производятся обычными способами, однако на бетоносмесительном узле должно быть установлено специальное оборудование для приготовления щелочного компонента (его дробления, дозировки, смешивания с водой). Смесительный бак для приготовления щелочного раствора оборудуется устройством для механического и пневматического перемешивания и подогрева воды. Не допускается смешивание бетонной смеси на шлакощелочном вяжущем с бетонной смесью на других видах вяжущего. Твердение бетонов на шлакощелочном вяжущем происходит при положительной температуре. Для ускорения твердения применяют прогрев при температуре до 95°C . Ориентировочный режим для изделий средней массивности: предварительная выдержка — 1 ... 2 ч, подъем температуры — 2 ... 3 ч, изотермический прогрев — 4 ... 7 ч, снижение температуры — 2 ... 3 ч.

Золами обычно называют остатки от сжигания твердого топлива (угля, сланца, торфа). Размер частиц золы менее $0,14 \text{ мм}$. Более крупные зерна относят к шлаковому песку и щебню. Золы-уноса (дымоходные золы) более однородны по составу и свойствам, чем золы отвала, поэтому они предпочтительнее для приготовления бетона. Пригодность золы для изготовления вяжущих и бетонов устанавливают путем опытной проверки химического состава и содержания вредных примесей, к которым относятся несгоревшие топливо, сера, негашенная известь, оксид магния. По виду сжигаемого топлива золы подразделяют на угольные, сланцевые и торфяные. В зависимости от модуля основности золы, как и шлаки, бывают кислые и основные (последние имеют $M_o > 1$).

Химический состав зол сильно колеблется в зависимости от вида топлива. В золе может быть $15 \dots 60\% \text{ SiO}_2$, $5 \dots 45\% \text{ Al}_2\text{O}_3$, $5 \dots 40\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$, $3 \dots 50\% \text{ CaO}$. В угольных золах больше содержится SiO_2 , в сланцевых и торфяных возрастает содержание CaO . Угольные и сланцевые золы в большинстве своем являются кислыми, золы горючих сланцев — основными.

Активностью золы называют ее способность при смешивании в тонкоизмельченном виде с воздушной известью и затворении водой твердеть в различных условиях. Активность повышается при наличии в золе кремнеземистого компонента или обожженных глинистых материалов и при повышении ее удельной поверхности. Зола является активным компонентом смешанного вяжущего и бетона, что обуславливает возможность ее эффективного использования для производства известково-зольных вяжущих, в качестве активной минеральной добавки в цементы и бетоны, для производства ячеистых бетонов. Химическая активность золы повышается при тепловой обработке бетона. Большой активностью обладают ос-

новные золы. Некоторые золы, полученные при сжигании сланцев и отдельных видов торфа и бурового угля, после тонкого помола могут использоваться как низкомарочные вяжущие вещества.

Плотность золы составляет $1,75 \dots 2,4 \text{ г/см}^3$, однако плотность отдельных фракций может значительно отличаться от средних значений. Насыпная плотность золы колеблется от 600 до 1300 кг/м^3 . Плотность зависит от вида топлива и температуры сжигания, обычно увеличивается с повышением последней. Мелкие частицы топлива при пылеугольном сжигании сгорают на лету. При этом на их поверхности образуется плотная оболочка, а внутри они имеют пористую структуру. Пористостью частиц объясняется средняя плотность золы. Размеры частиц золы зависят от сырья, способа сжигания, места отбора пробы и обычно колеблются в пределах $5 \dots 100 \text{ мкм}$.

Золы, используемые для изготовления железобетонных изделий, не должны содержать более 5% несгоревшего топлива (золы от сжигания антрацита и каменного угля — более 10%) и 1% серы, а также включений негашенной извести. Зола должна выдерживать стандартные испытания на равномерность изменения объема, при этом образцы-лепешки изготавливают из раствора нормальной густоты, сухая смесь которого состоит из 1 ч. цемента и 3 ч. золы. К зерновому составу золы обычно особых требований не предъявляется, но рекомендуется, чтобы для ячеистых бетонов использовалась зола с удельной поверхностью более $2500 \text{ см}^2/\text{г}$, а для плотных бетонов — не менее $1500 \text{ см}^2/\text{г}$. С увеличением помола золы возрастает не только прочность бетона, но также водопотребность бетонной смеси и усадка бетона, поэтому оптимальный зерновой состав золы, а также содержание облагораживающих добавок (активизирующих золу, пластифицирующих бетонную смесь и др.) целесообразно устанавливать предварительными опытами для конкретного вида золы и бетона.

Золы используют в качестве тонкомолотой добавки для снижения расхода цемента и тепловыделения в изделиях для гидротехнических сооружений, заменяя часть цемента золой, а также в тех случаях, когда по прочности бетона требуется меньший расход цемента, чем минимально допустимый по условию получения плотного бетона. Золы используют для приготовления искусственных пористых заполнителей: аглопоритового и зольного гравия. Аглопоритовый гравий из зол ТЭС готовят методом спекания сырцовых гранул на решетках агломерационных машин. Зольные пористые заполнители приближаются по своим свойствам к керамзиту, но дешевле его. На зольных пористых заполнителях можно получать аффективные легкие бетоны.

Золы можно использовать также для приготовления безобжигового зольного гравия. Этот гравий получают на тарельчатых грануляторах из смеси золы с $10 \dots 20\%$ вяжущего: цемента, извести, гипса, гипсоцементно-пуццоланового вяжущего и др. Сразу после

грануляции прочность гравия составляет 0,6 ... 1 МПа. После кратковременной тепловой обработки (2 ... 3 ч) гравий приобретает прочность 1 ... 2 МПа и используется для приготовления бетона. Дальнейшее твердение гравия происходит непосредственно в массе бетона, что обеспечивает высокую монолитность материала. Безобжиговый зольный гравий имеет плотность 600 ... 900 кг/м³ и прочность 4,5 ... 6 МПа (после нормального твердения в течение 28 сут). Из сырокатаных зольных гранул можно получать бетоны плотностью 900 ... 2000 кг/м³ и с прочностью 5 ... 40 МПа.

Для облегчения гравия в него вводят отходы ячеистого бетона и другие пористые материалы.

Безобжиговый зольный гравий получают при меньших затратах топлива, чем обжиговые заполнители (25 ... 30 кг усл. топлива и 40 ... 60 кВт·ч электроэнергии на 1 м³ гравия вместо 90 ... 110 кг). Для изготовления безобжигового гравия помимо золы можно использовать различные тонкомолотые отходы промышленного производства. Поскольку для приготовления безобжигового гравия идет вяжущее вещество, его применение должно в каждом конкретном случае обосновываться технико-экономическим расчетом.

Ячеистые бетоны, приготовленные с использованием до 60 ... 80% золы по массе, как правило, так же эффективны, как и ячеистые бетоны на тонкомолотом кремнеземистом заполнителе. Плотность сухого пенозолобетона

$$\rho'_{\text{сух}} = \frac{\rho'_{\text{я.с}}}{k(1 + В/В) + В_{\text{пн}}}, \quad (14.16)$$

где $\rho'_{\text{я.с}}$ — плотность сырой ячеистой смеси; k — коэффициент, учитывающий связанную воду, равный 0,9 для пенозолобетона и 0,85 для пенозолосиликата; $В/В$ — отношение количества воды к весу сухой смеси (цемент+зола или известь+зола); $В_{\text{пн}}$ — количество воды, вводимое с пенообразователем. При расчете плотности газозолобетонной смеси исключается член $В_{\text{пн}}$.

Прочность автоклавного золобетона обычно составляет: 3 ... 6 МПа при плотности 600 кг/м³; 5 ... 10 МПа при 800 кг/м³ и 12 ... 24 МПа при 1100 кг/м³. В строительстве наибольшее применение находят ячеистые золобетоны с плотностью 600 ... 1000 кг/м³.

§ 14.8 АРБОЛИТ

● Арболитом называют бетон на цементном вяжущем и органических заполнителях. Для получения заданных свойств в него вводят специальные химические добавки. В качестве органических заполнителей используют измельченную древесину из отходов лесозаготовок и деревообработки, а также костру льна, конопли, рисовую солому и дробленые стебли хлопчатника.

Органические заполнители с течением времени способны выделять вещества, отрицательно влияющие на гидратацию цемента,

Для компенсации этого влияния используют специальные добавки, например хлористый кальций, а древесную щепу перед употреблением выдерживают не менее одного месяца, предохраняя от увлажнения. Кроме того, органические заполнители при определенных условиях могут гнить или подвергаться биоповреждениям. Во избежание этих явлений конструкции из арболита используют, как правило, для зданий с относительной влажностью воздуха помещений не более 60% и при отсутствии агрессивных газов. В арболит также вводят жидкое стекло или комплексные добавки (жидкое стекло+хлористый кальций, жидкое стекло+сернистый глинозем, жидкое стекло+фуриловый спирт), образующие пленку на поверхности органических частиц и тем самым препятствующие протеканию деструктивных процессов в материале.

В арболит могут вводиться и другие добавки: пенообразующие и воздухововлекающие для регулирования пористости материала, ингибирующие для защиты арматуры от коррозии, гидрофобизирующие для повышения морозостойкости и стойкости материала при повышенной влажности.

Наружная поверхность изделий из арболита, соприкасающаяся с атмосферной влагой, должна иметь отделочный фактурный слой, обеспечивающий защиту арболита от увлажнения.

Арматуру в конструкциях из арболита защищают антикоррозионными покрытиями.

Арболит в зависимости от средней плотности в высушенном до постоянной массы состоянии подразделяют на теплоизоляционный (средняя плотность менее 500 кг/м³) и конструкционный (плотность 500 ... 850 кг/м³). Свойства арболита приведены в табл. 14.9.

Коэффициент вариации прочности конструкционного арболита не должен превышать 20%, а для изделий высшей категории качества — 15%. Для теплоизоляционного арболита коэффициент вариации не нормируется. Морозостойкость арболита не должна быть менее F25. Для приготовления арболита применяют различные

Таблица 14.9. Свойства арболита

Вид арболита	Класс по прочности на сжатии	Марка по прочности при осевом сжатии	Средняя плотность, кг/м ³ , арболита на			
			измельченной древесине	костре льна или дробленых стеблях хлопчатника	костре конопли	дробленой рисовой соломе
Теплоизоляционный	B0,35	M5	400...500	400...450	400...500	500
	B0,75	M10	450...500	450...500	450...500	—
	B1,0	M15	500	500	500	—
Конструкционный	B1,5	—	500...650	550...650	550...650	600...700
	B2,0	M25	500...700	600...700	600...700	—
	B2,5	M35	600...750	700...800	—	—
	B3,5	M50	700...850	—	—	—

портландцементы, за исключением пуццоланового цемента. Для конструктивного арболита марки цемента должны быть выше 400.

Органические заполнители должны удовлетворять следующим требованиям: размеры частиц измельченной древесины не должны превышать по длине 40, по ширине 10 и по толщине 5 мм; содержание примеси коры не должно быть более 10 %, а хвои и листьев — более 5 % по массе к сухой смеси заполнителей; показатель пригодности (удельный расход цемента на единицу прочности арболита при сжатии) должен быть не более 15; длина частиц костры конопля и льна, измельченных стеблей хлопчатника или рисовой соломы не должна быть более 40 мм, содержание очесов и пакли — не более 5 % от массы сухой смеси заполнителей.

Зерновой состав заполнителя для арболита

Размеры отверстий контрольных сит, мм	20	10	5	2,5	>2,5
Полные остатки на контрольных ситах, % по массе	до 5	20...40	40...75	90...100	до 10

Среднее значение коэффициента формы частиц (отношение наибольшего размера к наименьшему) не должно быть более 8. Количество частиц с коэффициентом формы более 8 не должно превышать 2 % для остатка на сите с отверстиями размером 20 мм и 10 % для остатков на ситах 10 и 5 мм.

Показатель пригодности измельченной древесины определяют (ГОСТ 19222—84) непосредственным испытанием древесины в арболите при $V/C=1,1$, расходе цемента около 360 кг/м^3 , расходе древесной крошки около 770 л/м^3 и хлористого кальция около 10 кг/м^3 . Коэффициент пригодности древесины

$$k_{пр} = \frac{C A_{ц}}{10 R_a R_{ц}}; \quad (14.17)$$

где C — расход цемента, кг/м^3 ; R_a — прочность арболита при сжатии, МПа; $A_{ц}$ — активность цемента, МПа; $R_{ц}$ — прочность эталонной марки цемента, принимаемая равной 40 МПа.

Прочность арболита определяют в образцах-кубах с размером ребра 15 см (для определения пригодности древесины 10 см), выдержанных 28 сут при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(70 \pm 10) \%$.

На производстве для приготовления арболитовой смеси используют смесители принудительного действия, для уплотнения смеси применяют прессование, трамбование, силовой прокат, вибропрессование. Для ускорения твердения применяют тепловую обработку в камерах при температуре не более 40°C и относительной влажности воздуха 50 ... 60 % и электропрогрев при температуре не более 50°C .

Состав арболита подбирают расчетно-экспериментальным способом. По табл. 14.10 ... 14.13 устанавливают ориентировочный расход материалов для первого исходного замеса, который затем уточняют по результатам опытов.

Пример 14.2. Требуется подобрать арболит класса В2,5 плотностью не более 65 кг/м^3 (в высушенном состоянии) для блоков наружных стен. Портландцемент М400, дробленка из отходов деревообработки с насыпной плотностью в сухом состоянии 120 кг/м^3 и влажностью по массе 50 %, в качестве добавки используют раствор хлорида кальция 10 %-ной концентрации.

Таблица 14.10. Расход цемента в арболите

Вид заполнителя	Ориентировочный расход портландцемента М400 на 1 м^3 арболита, кг, в зависимости от его класса					
	В0,5	В0,75	В1,0	В1,5	В2,0	В2,5
Дробленка из отходов:						
лесопиления и деревообработки	240	250	280	300	330	360
хвойных пород						
лесозаготовок хвойных пород	260	280	300	320	350	380
лесопиления и деревообработки	270	290	310	330	360	390
смешанных пород						
лесозаготовок смешанных пород	290	310	330	350	380	—
Одубина	280	300	320	340	370	400

Примечание. Приведенные расходы вяжущих рекомендуются лишь для приготовления первого исходного замеса при подборе состава арболитовой смеси и не могут служить нормами расхода вяжущих в производственных условиях. С учетом влажности расход древесной дробленки составляет 330 кг/м^3 .

Таблица 14.11. Расход органического заполнителя в арболите

Вид заполнителя	Ориентировочный расход сухого органического заполнителя на 1 м^3 арболита, кг, при портландцементе М400 и классе арболита					
	В0,5	В0,75	В1,0	В1,5	В2,0	В2,5
Дробленка из отходов:						
лесопиления и деревообработки	140	160	180	200	220	240
хвойных пород						
лесозаготовок хвойных пород	150	170	190	210	230	250
лесопиления и деревообработки	180	180	200	220	240	250
смешанных пород						
лесозаготовок смешанных пород	140	160	180	200	220	240
Одубина	160	180	200	220	275	290

Таблица 14.12. Расход воды в арболите

Вид заполнителя	Ориентировочный расход воды на 1 м^3 арболита при сухих органических заполнителях, л, при классе арболита					
	В0,5	В0,75	В1,0	В1,5	В2,0	В2,5
Дробленка из отходов:						
лесопиления и деревообработки	260	280	300	330	380	400
хвойных пород						
лесозаготовок хвойных пород	280	300	330	360	400	440
лесопиления и деревообработки	310	330	360	390	430	460
смешанных пород						
лесозаготовок смешанных пород	310	330	360	390	430	460
Одубина	210	230	250	270	300	370

Таблица 14.13. Расход химических добавок в арболите

Вид химических добавок	Максимальный расход химической добавки на 1 м ³ арболита, кг, в зависимости от вида заполнителей	
	древесная дробленка	одубина
Кальций хлористый технический	8	8...9
Стекло натриевое жидкое	8	—
Комплексная добавка: сернокислый глинозем	20	—
известь-пушонка	25	—

По табл. 14.10, Ц=360 кг/м³, по табл. 14.11, расход дробленки Др=240 кг/м³ и с учетом влажности Др'=360 кг/м³.

По табл. 14.12, В=400 л/м³. По табл. 14.13, расход хлорида кальция 8 кг/м³.

Расход раствора добавки определяют по формуле $A = D_d / (k\rho)$, где D_d — расход сухого вещества добавки, кг/м³; k — концентрация приготовленного раствора, %; ρ — плотность раствора. В нашем случае $A = 8 : 1,084 : 10 = 73,8$ л (1,084 — плотность 10%-ного раствора хлорида кальция).

В древесной дробленке воды содержится 120 л (при влажности 50%), в растворе хлорида кальция воды содержится 80—8=72 л. С учетом воды, содержащейся в древесной дробленке и в растворе добавки, при приготовлении арболитовой смеси необходимо использовать воды 400—120—72=208 л.

Плотность арболита в сухом состоянии

$$\rho'_{c.a} = 1,15Ц + Др + А. \quad (14.18)$$

где Ц, Др, А — соответственно расход цемента, древесной дробленки и химической добавки, кг/м³.

В нашем примере $\rho'_{c.a} = 1,15 \cdot 360 + 240 + 8 = 662$ кг/м³.

Так как полученная средняя плотность арболита превышает заданную проектную менее чем на 5% и соответствует требованиям табл. 14.16, то определенный состав арболита принимают в качестве исходного.

Плотность свежееужоженной арболитовой смеси $\rho'_{a.см} = 360 + 240 + 400 + 8 = 1008$ кг/м³.

Для определения оптимального состава арболита проводят контрольные испытания трех серий образцов с разным расходом цемента: одна — с расчетным расходом 360 кг/м³ и две — с расходом цемента приблизительно $\pm 15\%$ от расчетного, т. е. 310 и 410 кг/м³. По результатам опытов строят зависимость $R_a = f(\rho)$, по которой определяют необходимый расход цемента для получения заданного класса арболита.

Предварительно для каждого состава цемента определяют оптимальный расход древесной дробленки. Для этого готовят три состава арболитовой смеси с данным расходом цемента и расходом воды, установленным расчетом (400 л/м³) и отличающимися от него на $\pm 5\%$. По результатам испытания арболита в возрасте 3...7 сут определяют коэффициент конструктивного качества $KKK = R_a / \rho'_a$ и принимают за оптимальный расход дробленки, соответствующий наибольшему ККК.

Среднюю плотность арболитовой смеси и арболита проверяют на свежееотформованных образцах и затвердевших образцах арболита перед их испытанием.

ПРИГОТОВЛЕНИЕ И УПЛОТНЕНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ

§ 15.1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ

● *Приготовление бетонной смеси включает подготовку материалов, их дозирование и перемешивание бетонной смеси.* Обычно большинство операций по подготовке материалов, например дробление заполнителей, удаление загрязняющих примесей и другие подобные операции, осуществляют на предприятиях, производящих материалы. На заводах сборного железобетона или на стройках проводят, если имеется необходимость, активацию цемента, приготовление растворов химических добавок, оттаивание и подогрев заполнителя в зимнее время.

Активация цемента чаще всего заключается в его дополнительном помоле. Увеличение удельной поверхности на 15...30% повышает активность цемента и ускоряет его твердение. В возрасте 1 сут прочность бетона возрастает на 30...100%. Домол проводят сухим или мокрым способом. Часто домол цемента сочетают с применением химических добавок, что обеспечивает получение быстротвердеющих бетонов (см. гл. 11, 20). Однако активация цемента требует специального оборудования и значительных дополнительных затрат энергии, поэтому она применяется только при технико-экономическом обосновании.

Подготовка растворов химических добавок включает растворение в воде твердых, пастообразных или жидких продуктов добавок и последующее доведение раствора до заданной концентрации. Приготовление добавок осуществляют в специальных емкостях, снабженных системой трубопроводов для перемешивания раствора сжатым воздухом, а при необходимости — паровыми регистрами для подогрева. После приготовления добавки подают в расходную емкость, снабженную датчиком уровня, и по мере необходимости — через дозатор в бетоносмеситель. Определение состава бетона и количества раствора, вводимого в бетонную смесь, производят в соответствии с рекомендациями, изложенными в гл. 10.

Подогрев заполнителей обычно осуществляют в бункерах, реже непосредственно на крытых складах. Для подогрева используют либо контактный способ подогрева заполнителей с помощью паровых труб и гребенок, размещаемых в бункерах, либо непосредственно через заполнитель пропускают горячий воздух или газ. Последний способ более экономичен по затрате энергии, но требует специальных мероприятий по уменьшению потерь пара.

Важным технологическим переделом является *дозирование материалов.* На современных бетонных заводах используют в основном весовые дозаторы, т. е. дозирование материалов по массе: цемент, воду и добавки — с точностью до $\pm 1\%$, заполнители — с точностью $\pm 2\%$. Точность дозирования определяет требуемую

точность расчетов состава бетона; расход цемента указывают с точностью до 5 кг, воды — с точностью до 2 л (для полевых составов — до 5 л), песка и щебня — с точностью до 10 кг. При этом расход цемента округляют обычно в большую сторону, а воды — в меньшую. Большая точность состава бетона не требуется, так как существующие дозаторы не могут ее обеспечить.

В полевых условиях заполнители иногда дозируют по объему. При этом необходимо учитывать их влажность, особенно песка, так как увлажнение резко изменяет объем. Предположим, что заполнители в бетоне (Ц: В: П: Щ=330:178:600:1270) дозируют по объему и при этом не учтена влажность песка (3%), которая увеличивает его объем на 30%. Тогда при отмеривании прежнего объема песка (как для сухого материала) в бетонную смесь в действительности будет введено песка $P_{в.л.} = 600/1,3 = 460$ кг, а с учетом содержания в песке влаги $460(1-0,03) = 446$ кг. Абсолютный объем влажного песка составит $V_{в.л.п.} = 446/2,63 = 170$ л вместо абсолютного объема сухого песка $V_{сух.п.} = 600/2,63 = 228$ л, т. е. объем, занимаемый частицами песка, уменьшится на $228 - 170 = 58$ л. Для замещения этого объема потребуются дополнительные расходы цемента, воды и заполнителей. Перерасход цемента достигнет $\Sigma = 330 \cdot 58/1000 = 19$ кг. Кроме того, изменятся подвижность смеси, соотношение между песком и щебнем. В результате нарушения состава бетона могут заметно ухудшиться его свойства. Объемное дозирование заполнителя применяют для приготовления легкотонных смесей, когда наблюдаются большие колебания насыпной массы пористого заполнителя. В этом случае точность дозирования по объему пористых заполнителей составляет ± 30 л/м³. Возможно также использование объемно-весового дозирования, когда крупный заполнитель дозируют по объему, а песок — по массе с точностью $\pm (1 \dots 2)$ %.

Вторым важным технологическим переделом является *перемешивание бетонной смеси*. В процессе перемешивания материалов равномерно распределяются по всему объему зерна цемента и заполнителя, смачиваются водой, в результате получается однородная масса, свойства которой в любом месте объема одинаковы. Вид и состав бетона оказывают заметное влияние на требования к перемешиванию. Подвижные смеси легче перемешивать, чем жесткие: жирные перемешиваются лучше, чем тощие, крупнозернистые — лучше, чем мелкозернистые или тонкозернистые.

Применяют различные способы перемешивания в зависимости от вида и характеристик бетонной смеси. При использовании крупнозернистых подвижных смесей с заполнителем из плотных пород применяют смесители свободного падения, в которых перемешивание происходит при вращении барабана-смесителя в результате многократного подъема и сбрасывания материалов с некоторой высоты. Перемешивание жестких мелкозернистых и легкобетонных смесей на пористых заполнителях осуществляют в смесителях

принудительного действия, в которых необходимое для этих смесей более энергичное перемешивание достигается путем взаимного перемешивания материалов с помощью вращающихся лопаток и других подобных устройств. Разновидностью принудительного перемешивания является виброперемешивание, когда материалы в процессе перемешивания подвергаются вибрированию. В результате достигается некоторая активация цемента, что способствует повышению прочности бетона, особенно в раннем возрасте.

Большое влияние на качество перемешивания оказывает его продолжительность, которая в смесителях циклического действия определяется с момента загрузки всех материалов до начала выгрузки. Влияние времени перемешивания на прочность бетона и его однородность показана на рис. 15.1. При недостаточной продолжительности перемешивания ухудшается однородность бетона и понижается его прочность. Увеличение продолжительности перемешивания сверх оптимальной, соответствующей получению однородной бетонной смеси, мало сказывается на свойствах бетона и бетонной смеси (прочность бетона повышается, но крайне незначительно).

Оптимальная продолжительность перемешивания зависит от состава, характеристики бетонной смеси и типа применяемого смесителя. При перемешивании тяжелых бетонных смесей (с плотностью более 2200 кг/м³) в смесителях свободного падения наименьшая продолжительность перемешивания в зависимости от подвижности бетонной смеси и объема смесителя может назначаться в соответствии с данными табл. 15.1.

Для приготовления малоподвижных и умеренно жестких смесей продолжительность перемешивания следует увеличивать в 1,5 ... 2 раза. В смесителях принудительного действия перемешивание

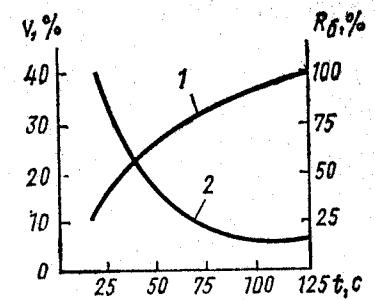


Рис. 15.1. Влияние времени t перемешивания на относительную прочность R_0 1 и однородность бетона 2:

v — коэффициент вариации

Таблица 15.1 Продолжительность перемешивания тяжелых бетонных смесей (с)

Объем приготовляемой бетонной смеси, л	Осадка конуса, см	
	2...6	более 6
300	60	45
800	120	90
1600	150	120

Таблица 15.2. Продолжительность перемешивания
легкобетонных смесей (мин)

Насыпная плотность крупного заполнителя, кг/м ³	Смесь					
	для плотного бето- на с жесткостью 5...15 с при предель- ной крупности зерен заполнителя, мм			для поризованного бетона при предель- ной крупности зерен заполнителя, мм		для крупно- пористого бетона
	10	20	40	20	40	
До 300	6	5	4	6	5	5
300...700	5	4	3	5	4	4
Более 700	4	3	2	4	3	3

крупнозернистых смесей обычно продолжается 2 ... 3 мин, мелкозернистых — 3 ... 5 мин.

Продолжительность перемешивания легкобетонных смесей зависит от вида бетона, качества заполнителя, консистенции бетонной смеси. Ориентировочно продолжительность перемешивания можно назначать по табл. 15.2. При использовании тонкомолотых добавок, предварительно не перемешанных с цементом, продолжительность перемешивания увеличивают в 1,5 ... 1,8 раза.

В рассмотренных ниже способах определения состава бетона предполагается, что продолжительность перемешивания смеси достаточна, а тип смесителя соответствует виду бетона. Если условия производства иные, то их необходимо учесть при корректировке состава бетона путем проведения пробных замесов.

§ 15.2. УПЛОТНЕНИЕ БЕТОННОЙ СМЕСИ

● На свойства бетона еще большее влияние, чем перемешивание, оказывает уплотнение бетонной смеси. Недоуплотнение приводит к резкому уменьшению прочности бетона (рис. 15.2), ухудшает его долговечность и другие свойства.

Из различных способов уплотнения бетонной смеси наибольшее распространение получило вибрирование. На заводах сборного железобетона изделия обычно формируют на специальных виброплощадках, монолитный бетон в конструкциях уплотняют глубинными (подвижные бетонные смеси) и поверхностными вибраторами.

При вибрировании частицам бетонной смеси сообщаются механические колебания, в результате чего связи между частицами постоянно нарушаются, силы трения и сцепления уменьшаются. Бетонная смесь приобретает свойства тяжелой жидкости и под влиянием сил тяжести расплывается, заполняет форму, и уплотняется.

Для уплотнения особо жестких смесей применяют вибрирование с пригрузом, вибропрессование и виброштампование. Для формо-

вания труб часто используют центрифугирование. Известны и другие способы уплотнения бетонной смеси, однако требования к ним одинаковые — они должны обеспечивать заданную степень уплотнения бетонной смеси. Для обычной тяжелой бетонной смеси коэффициент уплотнения, т. е. отношение фактической плотности к расчетной, должен быть не менее 0,98 и приближаться к 1.

Эффект виброуплотнения зависит от частоты колебания f и амплитуды A . Наиболее достоверным критерием эффективности вибрирования является показатель интенсивности вибрации ($\text{см}^2/\text{с}^3$). Интенсивность вибрации характеризует поток энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади вибрируемой бетонной смеси,

$$I = A^2 f^3, \quad (15.1)$$

где Af — путь, совершаемый колеблющейся частицей в единицу времени, т. е. скорость колебания; Af^2 — ускорение колебаний.

На рис. 15.3 приведен график для выбора параметров вибраций в зависимости от заданной ее интенсивности. Заштрихованная площадь соответствует наиболее распространенным на практике частотам и амплитудам вибраций. Для крупнозернистых тяжелых бетонных смесей амплитуда обычно равна 0,3 ... 0,7 мм, причем с повышением жесткости бетонной смеси ее увеличивают (при жесткости 4 ... 6 с $A=0,3$... 0,4 мм, при жесткости 8 ... 10 с $A=0,6$... 0,7 мм). Для мелкозернистых бетонных смесей амплитуда равна 0,15 ... 0,4 мм, при этом целесообразно увеличивать частоту вибрации. Слишком большие амплитуды колебаний без пригруза могут вызвать разрыхление бетонной смеси и ухудшить свойства бетона.

Для каждой бетонной смеси при принятых параметрах колебаний имеется оптимальная продолжительность вибрирования. При недостаточной продолжительности вибрирования наблюдается недоуплотнение бетона и снижение его прочности, слишком длительное вибрирование не дает заметного повышения плотности и прочности бетона (рис. 15.4). Кроме того, длительное вибрирование пластичных смесей может вызвать их расслоение. Обычно продол-

* В действительности выражение интенсивности $I = A^2 8\pi^3 f^3$, где A — в мм, f — в Гц; для относительной оценки множитель $8\pi^3$ обычно опускают.

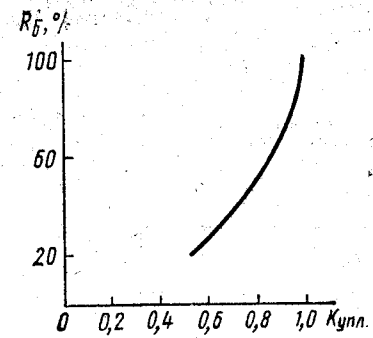


Рис. 15.2. Влияние относительной степени уплотнения ($K_{упл.}$) бетона на его прочность R_b при сжатии

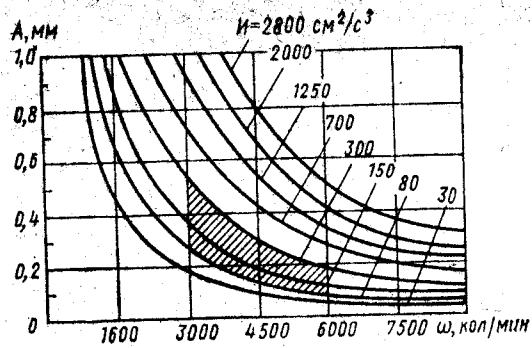


Рис. 15.3 Зависимость между амплитудами A и частотами колебаний ω при различной интенсивности I вибрации

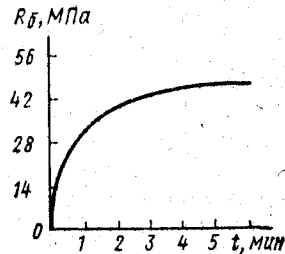


Рис. 15.4. Влияние продолжительности t вибрирования на прочность бетона R_b

жительность вибрирования принимают в 8... 10 раз больше показателя жесткости $J_{ст}$ бетонной смеси, определенной стандартным методом [$f = (3000 \pm 200)$ кол/мин, $A = 0,5$ мм], т. е.

$$t_{в} = (8 \dots 10) J_{ст}. \quad (15.2)$$

Если параметры n , следовательно, интенсивность вибрирования в производственных условиях $I_{пр}$ отличаются от стандартной $I_{ст}$, то продолжительность вибрирования ориентировочно можно определять по формуле

$$t_{в1} = t_{в} \sqrt{I_{ст}/I_{пр}}. \quad (15.3)$$

Пример 15.1. Определить продолжительность вибрирования бетонной плиты на вибростоле с частотой 5500 кол/мин и амплитудой 0,2 мм. Мелкозернистая бетонная смесь имеет показатель жесткости 8 с.

По графику рис. 15.3, $I_{пр} = 300 \text{ см}^2/\text{с}^3$.

По формуле (15.3), $t \approx 8 \cdot 8 \sqrt{250/300} \approx 55 \text{ с}$.

Для тщательного уплотнения жестких легкобетонных смесей необходимо повышать интенсивность вибрирования, увеличивать его продолжительность и использовать пригруз, чтобы предохранить бетонную смесь от расслоения. Режим вибрирования легкобетонных смесей можно ориентировочно назначать по табл. 15.3.

Назначенные режимы уплотнения следует проверять на практике, выбирая те из них, которые обеспечивают заданную степень уплотнения.

При уплотнении бетонной смеси вибрированием необходимо учитывать, что амплитуда колебаний с увеличением расстояния от вибратора постепенно затухает. Затухание сильнее проявляется при применении высокочастотного вибрирования. Ориентировочно изменение амплитуды затухания можно оценить по формуле (15.4) для глубинного вибрирования и формуле (15.5) для поверхностно-

Таблица 15.3. Режим уплотнения вибрированием легкобетонной смеси на вибростоле при частоте колебаний 3000 кол/мин

Смесь	Рекомендуемая минимальная амплитуда колебаний, мм	Рекомендуемый пригруз на поверхность бетонной смеси при ее вибрации, Па	Продолжительность вибрирования смеси в изделии, с
Плотная жесткая (с жесткостью 15... 25 с)	0,6	3... 4	150... 180
Плотная умеренно жесткая (с жесткостью 8... 15 с)	0,6	2... 3	120... 150
Плотная малоподвижная (с осадкой конуса 1... 3 см)	0,35	Не требуется	90... 120
Плотная подвижная (с осадкой конуса 3... 15 см)	0,35	То же	60... 90
Поризованная газом	0,35	"	90... 180
Поризованная пеной	0,35	"	60... 90
Поризованная с воздухововлекающими добавками	0,35	"	120... 150
Крупнопористая	0,35	По необходимости не более 2	30
Малопесчаная	0,6	3... 4	120... 180

Таблица 15.4 Коэффициент затухания см^{-1}

Частота колебаний, кол/мин	Бетон на портландцементе с подвижностью, см			Бетон на пуццолановом портландцементе при подвижности 4... 6 см
	0... 1	2... 4	4... 6	
3000	0,13	0,10	0,07	0,19
4500	0,12	0,09	0,06	0,16
6000	0,11	0,08	0,05	0,12

го вибрирования:

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{x_1}{x_2}} e^{-\frac{\alpha}{2}(x_2 - x_1)}, \quad (15.4)$$

$$A_2 = A_1 e^{-\frac{\alpha}{2}h}, \quad (15.5)$$

где A_i — амплитуда колебаний, см; x_i — расстояние от вибратора (от его геометрической оси); α — эмпирический коэффициент затухания колебаний, учитывающий реологические свойства бетонной смеси, см^{-1} (табл. 15.4); e — основание натуральных логарифмов; h — высота слоя бетонирования, см.

При уплотнении бетонной смеси необходимо, чтобы даже на участках, наиболее удаленных от вибратора, амплитуда колебаний или интенсивность вибрации были достаточны для уплотнения бетонной смеси с учетом ее реологических характеристик.

В последнее время получают распространение низкочастотное вибрирование, в том числе с асинхронным видом колебаний, и ударные способы уплотнения бетонной смеси, которые обеспечивают экономию энергии, уменьшают опасность вибрационного воздействия на рабочих и понижают воздухоовлечение в бетонную смесь, способствуют получению изделий с гладкой лицевой поверхностью. В обычном вибрировании при колебании опалубки или стенок формы и бетонной смеси часто возникает запаздывание фаз колебаний, что приводит к периодическому появлению пустот между формой и бетонной смесью, при захлопывании которых образуются воздушные поры, перемещающиеся в глубину бетонной смеси.

При станковом или поверхностном вибрировании наибольшее количество воздушных пор образуется у поверхности изделия, что существенно ухудшает ее качество. При глубинном вибрировании наибольшее воздухоовлечение наблюдается в глубине бетона, а поверхность изделия получается более гладкой. При вибрировании часть вовлеченного воздуха удаляется из бетона, однако остаточное количество вовлеченного воздуха может быть достаточно большим. Оно увеличивается с уменьшением крупности заполнителя, особенно в мелкозернистых смесях, при применении специальных воздухоовлекающих добавок и при несоответствии реологических свойств бетонной смеси характеристикам применяемого режима уплотнения.

При применении специальных добавок воздухоовлечение в небольшом количестве в виде мельчайших пузырьков воздуха увеличивает долговечность бетона. Воздуховлечение, образующее крупные воздушные поры, приводит к понижению прочности бетона, ухудшению внешнего вида. Подобного воздухоовлечения в бетонную смесь следует избегать. Этого можно достигнуть, применяя формы с гладкой поверхностью, вязкие смазки, улучшающие совместную работу формы и бетонной смеси, а также достаточно пластичные и вязкие бетонные смеси с пониженной склонностью к воздухоовлечению при вибрировании.

При ударном способе вибрирования изделий форма с бетонной смесью многократно поднимается и падает с небольшой высоты, как при испытании раствора на встряхивающем столике. При этом происходит постепенное уплотнение бетонной смеси. Способ позволяет уплотнять изделия значительной высоты и сложной конфигурации, однако требует применения пластичных или малоподвижных бетонных смесей.

При асинхронном низкочастотном вибрировании механический привод установки обеспечивает колебания формы с частотой 600 ... 1000 кол/мин. Установка специальных резиновых ограничите-

лей тормозит движение площадки сверху вниз и способствует возникновению ударного воздействия на бетонную связь. Сочетание вибрационного и ударного воздействия обеспечивает высокую эффективность уплотнения бетонной смеси, в том числе жесткой бетонной смеси. Для повышения эффективности работы установки и снижения энергозатрат стараются обеспечить ее работу в резонансном режиме.

Определенный интерес представляют безвибрационные методы уплотнения бетонной смеси. Из них наибольшее распространение получили наливной и набивной способы и центрифугирование. При наливном способе применяют очень подвижные или литые бетонные смеси, которые транспортируют по трубопроводам и заливают в опалубку или форму. Такие смеси не требуют вибрации, хорошо заполняют форму, однако в этом случае применяют специальные мероприятия, препятствующие расслоению бетонной смеси, например вводят химические добавки или тонкомолотые водоудерживающие добавки. Подобные бетонные смеси, имея высокое водосодержание, затрудняют получение прочных и долговечных бетонов. Однако наливной способ обладает очень высокой производительностью и с учетом появления в последнее время эффективных химических добавок суперпластификаторов, способствующих получению очень подвижных бетонных смесей при ограниченном водосодержании, может успешно применяться для бетонов низких и средних марок.

Набивной способ, наоборот, позволяет эффективно уплотнять бетонные смеси с низким водосодержанием и водоцементными отношениями. При этом составляющим бетонной смеси сообщается определенное количество кинетической энергии, под действием которой бетонная смесь забрасывается в форму и уплотняется.

Известно много разновидностей этого способа, которые можно объединить в три группы: 1) частицы цемента и заполнителя подаются сжатым воздухом в сопло установки, где смешиваются с водой и под действием энергии сжатого воздуха забрасываются в форму или на обрабатываемую поверхность сооружения. Этот способ носит название «шприц-бетон»; 2) бетонная смесь перемешивается заранее и через специальное сопло под действием сжатого воздуха забрасывается в форму — «набрызг-бетон». В этом случае приходится применять более подвижные смеси, чем в первом, и, кроме того, трудно обеспечить смеси большое количество кинетической энергии, что несколько уменьшает эффективность уплотнения; 3) заранее приготовленной бетонной смеси тем или иным механическим способом сообщается кинетическая энергия, необходимая для набрызга смеси в форму и ее уплотнения. На практике получили распространение набрызгивающие устройства в виде двух быстро вращающихся валов, в щель между которыми подается бетонная смесь из бункера. Соприкасаясь с валами, бетонная смесь приобретает ускорение, необходимое для набрызга в форму. Обес-

печивая достаточно высокое уплотнение бетонной смеси, набивные способы не позволяют получать гладкой открытой поверхности бетона и требуют специальных дополнительных операций по ее отделке.

В последнее время получает распространение уплотнение жестких бетонных смесей с помощью быстро катящихся по ее поверхности цилиндров — роликное уплотнение. Этот способ чаще применяют при формировании бетонных труб.

ГЛАВА 16

БЕТОНИРОВАНИЕ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 16.1. ТЕХНОЛОГИЯ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

● *Монолитными называются конструкции, которые возводятся непосредственно на месте их расположения.* Возведение конструкций включает установку опалубки, которая воссоздает в пространстве очертания будущей конструкции, установку арматуры, бетонирование конструкции, уход за твердеющим бетоном.

Опалубка может быть деревянной из досок и фанеры, металлической из металлических листов или сетки, деревянной с полимерным покрытием, железобетонной. Иногда в качестве опалубки используют железобетонные плиты, которые являются частью будущей сборно-монолитной конструкции.

Арматуру устанавливают в соответствии с проектом. Для ее соединения используют сварку. В ряде случаев применяют заранее изготовленные арматурные каркасы, что ускоряет производство работ. Для ответственных конструкций используют так называемую жесткую арматуру в виде двутавров, швеллеров и проката специальных профилей.

Бетонирование больших сооружений или конструкций ведут отдельными блоками, устраивая между ними рабочие швы. Блок бетонируют непрерывно, в этом случае каждая последующая порция бетона должна укладываться и уплотняться до того, как схватится ранее уложенный бетон. Бетонную смесь, как правило, готовят на централизованных бетоносмесительных узлах или заводах и затем транспортируют к месту укладки.

Транспорт бетона, его укладка в блок и последующий уход определяют качество бетона, строительные-технические свойства и долговечность конструкции. Каждый шаг в транспортировании и укладке бетона нужно внимательно контролировать для сохранения однородности бетонной смеси внутри замеса и из замеса в замес, чтобы конструкция имела одинаковое качество. Для этого необходимо следить за тем, чтобы не было отделения крупного заполнителя от раствора или воды от других составляющих. Расслоение в месте выгрузки из бетоносмесителя можно предотвратить прикреп-

лением к концу разгрузочного лотка направленной книзу течки, чтобы бетон падал вертикально в центр приемной бадьи, бункера или тележки. Подобные приспособления следует устанавливать на концах всех других желобов и транспортеров.

Все бункера необходимо снабжать вертикальной подвеской под разгрузочными отверстиями. При разгрузке под углом крупный заполнитель отбрасывается к дальней стороне загружаемого контейнера, а раствор — к ближайшей стороне, в результате чего происходит расслоение, которое нельзя ликвидировать при дальнейшей перевозке бетона.

Бетон транспортируют различными способами: с помощью лотков, транспортеров, бадьями, вагонетками, автобетоносмесителями, автосамосвалами и нагнетанием по трубам. Способ транспортирования следует назначать исходя из условий укладки. Если эти условия позволяют применить малоподвижную бетонную смесь, оборудование должно быть запроектировано и приспособлено так, чтобы облегчить транспортирование подобной смеси. Для этого могут потребоваться лотки значительного размера с крутым углом наклона к горизонтали и увеличенным разгрузочным отверстием. С помощью лотков, транспортеров и нагнетанием по трубам бетонную смесь транспортируют на небольшие расстояния. Для перевозки смеси на значительные расстояния используют бадьи и автомашины. Бадьи бывают различной формы, конструкции и размеров, емкостью 0,75 ... 6 м³. Некоторые большие бадьи имеют прямоугольное очертание, но большинство бадей — цилиндрическую форму. Разгрузка бетонной смеси производится путем открытия затвора, который установлен в дне бадьи. Бадьи для бетонирования больших бетонных массивов часто имеют прямые стенки и затворы, которые обеспечивают выпуск смеси по всей площади дна. В других случаях лучше применять бадьи, имеющие коническую нижнюю часть, сужающуюся к небольшому отверстию с затвором. При бетонировании небольших секций целесообразно применять затворы, которыми можно регулировать истечение бетонной смеси и производить ее выгрузку по частям. Затворы могут приводиться в действие вручную или с помощью механических и пневматических средств. Там, где бадьи транспортируют краном, затворы с механическими или пневматическим приводом безопаснее, так как они позволяют лучше регулировать разгрузку и тем самым предотвращают внезапные рывки крана.

Бадьи транспортируют на железнодорожных платформах, автомашинах, кранами или комбинацией этих средств. При любом методе транспортирования следует предохранять бетонную смесь от вибрирования и встряхивания, так как это может вызвать ее расслоение, особенно если она имеет пластичную консистенцию. Бетонную смесь удобно транспортировать в автобетоносмесителях. Если перевозится смесь, заранее приготовленная в стационарном бетоносмесителе, то ее можно загрузить на 50% больше, чем если

Таблица 16.1. Максимально допустимые расстояния (км) транспортирования бетонной смеси автотранспортном при температуре воздуха около 20°C

Вид дорожного покрытия	Подвижность бетонной смеси, см	Скорость транспортирования, км/ч	Расстояние при транспортировании	
			автотонно-вом	автосамосвалом
Жесткое, бетонное или асфальто-бетонное	1...3	30	45	30
	4...6		30	20
	7...9		20	15
	10...14		15	10
Мягкое грунтовое улучшенное	1...3	15	12	7,5
	4...6		8	5,0
	7...9		5,4	3,7
	10...14		4,0	2,5

смесь готовят непосредственно в автобетоносмесителе. На стройках для транспорта бетонной смеси широко используют автосамосвалы. Однако перевозка автосамосвалами может производиться только на небольшое расстояние по ровным подъездным путям так, чтобы избежать расслоения бетонной смеси. В табл. 16.1 указана допустимая дальность перевозки бетонной смеси различными автотранспортными средствами.

При перевозке следует учитывать потерю подвижности бетонной смеси вследствие гидратации цемента и частичной потери воды из-за испарения, состав бетона назначать с учетом этого явления.

Подвижность смеси, которую должна иметь бетонная смесь при ее приготовлении,

$$OK_3 = OK_{об} / \eta, \quad (16.1)$$

где $OK_{об}$ — осадка конуса, требуемая для ее укладки на объекте после перевозки, см; η — коэффициент потери подвижности, зависящий от дальности или времени перевозки (табл. 16.2).

Таблица 16.2. Значения коэффициента потери подвижности η *

Подвижность бетонной смеси, см	Дальность перевозки, км			Подвижность бетонной смеси, см	Дальность перевозки, км		
	10	20	30		10	20	30
1...3	0,4	0,2	0,15	7...9	0,50	0,35	—
4...6	0,45	0,25	—	10...14	0,55	—	—

*Если перевозка бетонной смеси осуществляется при температуре ниже -10°C , то коэффициент η увеличивается на 20%, так как при понижении температуры замедляется гидратация цемента и уменьшается потеря подвижности во времени.

Удобно транспортировать бетонную смесь нагнетанием по стальным трубопроводам, причем этот способ особенно благоприятен при производстве работ в тоннелях, возведении высотных зданий и сооружений и в других местах с ограниченным рабочим пространством. Для нагнетания бетонной смеси используют чаще всего мощные горизонтально-поршневые насосы одностороннего действия производительностью до $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Бетоноводы имеют внутренний диаметр 76 ... 283 мм. Бетонную смесь можно нагнетать по прямому горизонтальному участку труб на расстояние до 180 ... 300 м в зависимости от мощности насоса и диаметра труб. Расстояние нагнетания по вертикали определяют из расчета, что нагнетание на 1 м по вертикали эквивалентно нагнетанию на 8 м по горизонтали. Изгиб на 90° эквивалентен 12-метровому горизонтальному участку труб, а изгиб на 45° — 6-метровому участку.

Нагнетание требует применения удобоукладываемой бетонной смеси с повышенным содержанием мелкого заполнителя. Предельная крупность щебня должна быть менее $1/3$ диаметра бетоновода. Обычно применяют бетонные смеси с осадкой конуса более 8 см при использовании бетононасосов с гидравлическим приводом смеси и осадкой более 4 см. Рекомендуется применение добавок-пластификаторов.

Для успешного действия насоса необходимо постоянное питание его однородной бетонной смесью. Чтобы содействовать сохранению однородности смеси, приемный бункер, питающий насос, часто снабжают устройством для повторного перемешивания бетонной смеси, загружаемой в бункер. Опалубка должна быть чистой, плотной, достаточно раскреплена и выполнена из материалов, которые придадут затвердевшему бетону желаемую фактуру. Для облегчения распалубки опалубку можно смочить водой, смазать специальными составами или покрыть полимерной пленкой. На рис. 16.1 приведены рекомендации по правильным приемам бетонирования монолитных конструкций.

Бетонную смесь нужно разгружать как можно ближе к месту ее окончательной укладки. Не следует укладывать бетонную смесь большими порциями в одно место с последующим перемешиванием в опалубке при транспортировании на значительные расстояния, так как это вызывает ее расслоение. Бетонную смесь следует укладывать горизонтальными слоями одинаковой толщины и каждый слой полностью уплотнять перед укладкой следующего. Слои должны быть толщиной 15 ... 30 см для железобетонных конструкций и толщиной до 45 см для массивных сооружений, причем толщина слоя будет зависеть от расстояния между опалубкой, количества арматуры и должна быть гакова, чтобы можно было закончить укладку каждого нового слоя до схватывания предыдущего.

Бетонная смесь не должна свободно падать с высоты более чем 0,9 ... 1,2 м. В тонких конструкциях следует применять подвесные металлические или резиновые желоба. В ограниченном про-

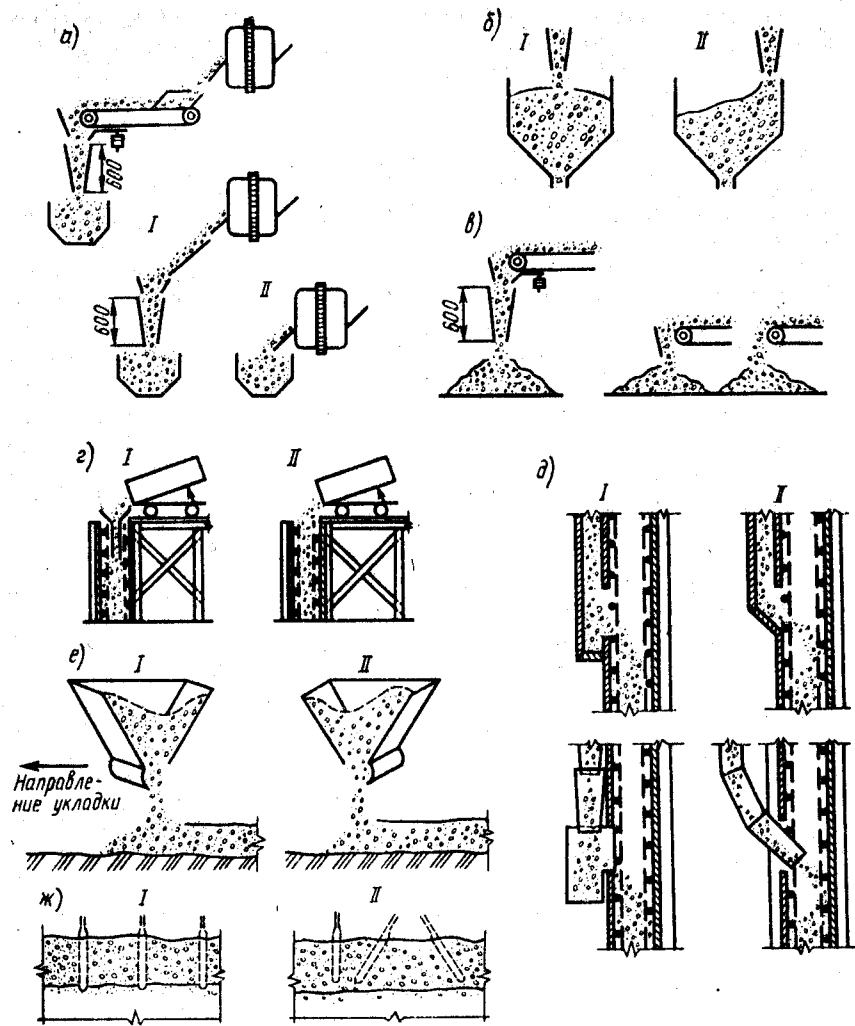


Рис. 16.1. Способы укладки бетонной смеси:

а — разгрузка бетоносмесителя; б — загрузка бункеров; в — разгрузка транспортеров; г — укладка бетонной смеси в стены; д — то же, через боковое отверстие; е — бетонирование плит; ж — вибрирование бетонной смеси при ее послойной укладке; I — правильно, II — неправильно (размеры — в мм)

странстве между опалубкой тонких стен можно устанавливать металлические желоба прямоугольного сечения, чтобы разместить их между стержнями арматуры. Подвесные желоба следует применять различной длины. Они должны состоять из секций, которые можно крепить с помощью крючков одну к другой, регулируя тем самым длину желобов, по мере бетонирования. В высокие тонкие стены

бетонную смесь иногда укладывают через отверстия на боковых сторонах опалубки, которые обычно называют «окнами». Если бетонную смесь загружают с лотка прямо через отверстие, возможно ее расслоение. Применение внешнего бункера позволяет бетонной смеси равномерно проходить через отверстия и тем самым уменьшает опасность ее расслоения.

Иногда при быстрой укладке бетонной смеси в высокие стены возможно выделение некоторого количества воды на ее верхней поверхности. Это выделение воды можно уменьшить путем более медленной укладки бетонной смеси на более мелком материале, т. е. с большим количеством цемента или более мелким заполнителем либо с тем и другим. При бетонировании высоких стен бетонную смесь следует укладывать до точки приблизительно на 30 см ниже верха стены и выдерживать около 1 ч, чтобы произошла ее осадка. Затем, до того как уложенный бетон схватится, бетонирование надо возобновить во избежание образования шва. Бетонную смесь укладывают на несколько сантиметров выше опалубки и затем избыточный бетон после его частичного схватывания удаляют.

Для того чтобы избежать образования трещин вследствие осадки, бетон в колоннах и стенах выдерживают по крайней мере в течение 2 ч до начала бетонирования плит, балок и прогонов, которые опираются на эти колонны и стены. Вуфы и капители бетонруют совместно с полом или кровлей. При бетонировании плит укладку бетонной смеси надо учитывать с дальнего конца сооружения так, чтобы каждый замес бетонной смеси разгрузался вплотную к ранее уложенной смеси. Не следует укладывать бетонную смесь отдельными кучками и затем эти кучки разравнивать и обрабатывать. Если имеются пустоты между крупными зернами заполнителя, то некоторые наиболее крупные зерна нужно удалить и распределить их по площади в те места, где имеется большее количество раствора.

Порядок укладки бетонной смеси также имеет значение. В стенах первые замесы укладывают в любом конце секции, затем укладку ведут по направлению к середине. Этот способ производства работ должен повторяться для каждого слоя. Его можно также использовать и при укладке балок или прогонов. В большие открытые блоки первые замесы укладывают по их периметру. Во всех случаях способ производства работ должен быть таким, чтобы предотвратить скопление воды в концах и углах опалубки и вдоль ее поверхности.

В обычных условиях бетон нужно компактно укладывать и уплотнять вибрированием с помощью вибраторов внутреннего или наружного действия. В процессе уплотнения должны устраняться пустоты и крупные пузырьки воздуха, обеспечиваться хорошее сцепление каждого нового слоя бетона с ранее уложенным слоем, арматурой и закладными частями, а также выделение на лицевых и

верхней поверхности достаточного количества мелкого заполнителя, что необходимо для производства соответствующей отделки.

Вибрирование само по себе не делает бетон более прочным, водонепроницаемым или стойким против действия попеременного замораживания и оттаивания. Оно лишь позволяет применять менее пластичные смеси и тем самым использовать либо бетонные смеси с пониженным водоцементным отношением, либо при заданном водоцементном отношении уменьшить расход цемента. Вибрирование дает также возможность избежать применения литых смесей, которые имеют тенденцию к отделению цементного молока и расслоению. Кроме того, при применении вибрации получают лучшие поверхности бетона и более прочные рабочие швы.

Вибраторы не следует использовать для перемещения бетонной смеси на большие расстояния в горизонтальном направлении. Бетонную смесь надо разгружать как можно ближе к месту ее окончательной укладки, разравнивать слоями и затем подвергать вибрации. Перед вибрированием может потребоваться штыкование или трамбование бетонной смеси, чтобы обеспечить гладкую поверхность и уменьшить образование раковин пор на поверхностях, прилегающих к опалубке.

Внутренний вибратор имеет вибрирующий элемент, который погружается в бетонную смесь. Поверхностный вибратор может прикрепляться к опалубке или перемещаться по поверхности бетонной смеси. Внутренние вибраторы должны погружаться в бетонную смесь в вертикальном положении на расстоянии около 50 см один от другого в зависимости от применяемого оборудования и характера бетонной смеси. Это расстояние следует выбирать так, чтобы зоны вибрирования от каждого погружения немного перекрывали друг друга. Вибратор должен погружаться на всю глубину укладываемого слоя и даже немного проникать в нижележащий слой, если бетон этого слоя еще становится пластичным под действием вибрации. Однако если нижний слой уложен сравнительно давно, проникание вибратора в него может вызвать искажение поверхности между двумя слоями. Это нежелательно, особенно в тех случаях, когда важен хороший внешний вид конструкции.

Следует принимать меры предосторожности против излишне долгого вибрирования в одной точке, так как это приводит к расслоению бетонной смеси. Продолжительного вибрирования надо избегать, если применяется слишком пластичная бетонная смесь. С другой стороны, необходимо стремиться, чтобы не осталось непровибрированных участков и чтобы было обеспечено полное уплотнение бетонной смеси без ее расслоения. На возможность окончания вибрирования обычно указывает выделение раствора вдоль опалубки и погружение частиц крупного заполнителя в раствор.

Задержка начала вибрирования безвредна до тех пор, пока бетонная смесь еще способна разжижаться под давлением вибрации и вибратор не оставляет в ней углублений. Если арматура закреп-

лена жестко и не может перемещаться, нежелательно, чтобы вибратор касался ее. Следует принимать меры предосторожности против вибрации арматуры, выступающей из частично затвердевшего бетона. Внутренние вибраторы не должны соприкасаться с опалубкой, так как они будут повреждать ее поверхность, а это отразится на качестве поверхности бетона.

Важное значение имеет уход за бетоном. Необходимыми условиями для твердения являются присутствие влаги и наличие благоприятной температуры. Свежеуложенный бетон содержит больше воды, чем необходимо для полной гидратации цемента, но в большинстве случаев в производственных условиях значительное количество этой воды будет потеряно в результате испарения, если не принять мер предосторожности. При температуре ниже нормальной гидратация протекает намного медленнее, а при температуре, близкой к точке замерзания или ниже ее, химические реакции прекращаются. Таким образом, бетон необходимо предохранять от потери влаги на ранней стадии твердения и выдерживать при температуре, которая содействовала бы гидратации цемента. Бетон также следует защищать от повреждения при последующих строительных работах.

Влагу в бетоне можно сохранить несколькими способами, например задержкой распалубки, поливкой или устройством запруд, применением влагоудерживающих покровов или с помощью защитного слоя, который наносится на бетон в жидком виде и, затвердевая, образует тонкую пленку. В жаркую, сухую погоду деревянные формы будут быстро высыхать, поэтому их сохраняют влажными с помощью полива.

Следует предохранять поверхности от высыхания и в промежутке между поливками. Процесс попеременного увлажнения и высыхания свежеуложенного бетона приводит к образованию волосных трещин или растрескиванию поверхности. Непрерывное разбрызгивание воды обеспечивает более постоянный приток влаги, чем обильная поливка водой, чередующаяся с периодами высыхания. На плоских поверхностях, например на покрытиях дорог, тротуарах, полах, кровлях, устраивают запруды. Запруды создают более благоприятные условия, чем разбрызгивание. Можно применять для укрытия поверхности бетона водонепроницаемую бумагу или пленку. В швах полотнища бумаги или пленки должны перекрывать одно другое на несколько сантиметров, а швы следует проклеивать.

Защитные составы для ухода за бетоном бывают черными, белыми или бесцветными. Обычно защитные составы наносят в один слой. Но лучшие результаты дает окрашивание в два слоя. Окраска должна производиться немедленно после окончания отделки бетона. Если случится задержка, то бетон до момента окрашивания должен сохраняться влажным. На поверхности, прилегающие к опалубке, защитный слой следует наносить после их распалубки

и увлажнения. Там, где пленку нужно предохранять от повреждения при движении, ее следует покрывать слоем песка толщиной в 2 ... 3 см либо защищать каким-нибудь другим способом. Защитный слой песка или земли укладывают не ранее чем через 24 ч после нанесения защитного состава. Хорошие результаты дает применение лака «этиноль».

§ 16.2. ЗИМНЕЕ БЕТОНИРОВАНИЕ

● При бетонировании зимой необходимо обеспечить твердение бетона в теплой и влажной среде в течение срока, устанавливаемого и обеспечивающего набор бетоном критической прочности (см. гл. 9), гарантирующей сохранение структуры бетона и удовлетворительное его твердение после оттаивания.

Это достигается двумя способами: 1) использованием внутреннего запаса теплоты бетона; 2) дополнительной подачей бетону теплоты извне, если внутренней теплоты недостаточно. При первом способе необходимо применять высокопрочный и быстротвердеющий портландцемент, использовать ускорители твердения цемента — хлористый кальций и др., уменьшать количество воды в бетонной смеси, вводя в нее пластифицирующие воздухововлекающие добавки. Все это даст возможность ускорить сроки твердения бетона при возведении сооружений и добиться того, чтобы бетон приобрел достаточную прочность перед замораживанием. Внутренний запас теплоты в бетоне создают путем подогревания материалов, составляющих бетонную смесь, кроме того, в твердеющем бетоне теплота выделяется при химической реакции, происходящей между цементом и водой (экзотермия цемента). В зависимости от массивности конструкций и температуры наружного воздуха подогревают воду для бетона (до 90 °С) или воду и заполнители — песок, гравий, щебень (до 50 °С). Бетонная смесь при выходе из бетоносмесителя должна иметь температуру не выше 40 °С, так как при более высокой температуре она быстро густеет. Минимальная температура бетонной смеси при укладке в массивы должна быть не ниже 5 °С, а при укладке в тонкие конструкции — не ниже 20 °С.

В последнее время применяют новый способ — *электроподогрев* бетонной смеси в специальном бункере непосредственно перед укладкой в конструкцию. В этом случае электрический ток пропускают через бетонную смесь и разогревают ее до 50 ... 70 °С. Разогретую смесь надо сразу же укладывать и уплотнять, так как она быстро густеет.

В процессе твердения цемент выделяет значительное количество теплоты. Эта теплота выделяется главным образом в первые 3 ... 7 сут твердения. Чтобы сохранить теплоту в бетоне на определенный срок, опалубку и все открытые части бетона покрывают хорошей изоляцией (матами из минеральной ваты, пенопласта, опилками, шлаком и т. д.), толщина которой определяется тепло-

техническим расчетом. Этот способ зимнего бетонирования называют *способом термоса*, так как подогретая бетонная смесь твердеет в условиях теплоизоляции. Применение данного способа рационально, если теплота, необходимая для его первоначального твердения, сохраняется в бетоне по крайней мере 5 ... 7 сут. Это возможно только при массивных или тщательно изолированных средних по толщине конструкциях, имеющих отношение охлаждающейся поверхности бетона к его объему, так называемый модуль поверхности, не более 6.

Конструкции более тонкие или со слабой теплоизоляцией, а также возводимые при очень сильных морозах следует бетонировать с подачей теплоты извне. Существуют три разновидности этого способа. Первая разновидность — *обогрев бетона паром*, пропускаемым между двойной опалубкой, окружающей бетон, или по трубам, находящимся внутри бетона или установленным в опалубке. Обычная температура пара 50 ... 80 °С. При этом бетон твердеет быстро, достигая в течение 2 сут такой прочности, которую приобретает через 7 сут при нормальном твердении.

Вторая разновидность — *электропрогрев*, который осуществляют, пропуская через бетон электрический переменный ток. Для этого стальные пластинки — электроды, соединенные с электрическими проводами, укладывают сверху или с боковых сторон конструкции бетона в начале его схватывания. При электроподогреве в колонне или балке в бетон закладывают продольные электроды или вбивают короткие стальные стержни для присоединения проводов. После затвердения бетона выступающие концы этих стержней срезают. Пластинчатые электроды применяют главным образом для подогрева плит и стен, продольные электроды и поперечные короткие стержни — для балок и колонн. В начале подогрева обычно подается ток низкого напряжения (50 ... 60 В), получаемый путем трансформирования обычного тока 220 В. Сырой бетон при пропускании тока разогревается и затвердевает. По мере затвердения бетона его электрическое сопротивление возрастает и напряжение приходится повышать. Нагревать бетон следует медленно, чтобы избежать высушивания и появления в нем трещин (повышать температуру нужно не более чем на 5 °С в час), и доводить температуру бетона до 60 °С. При этих условиях бетон в течение 36 ... 48 ч твердения приобретает прочность, не меньшую чем за 7 сут нормального твердения. При бетонировании массивных сооружений зимой целесообразно применять электропрогрев только поверхностного слоя бетона (так называемый периферийный электропрогрев), чтобы предохранить его от преждевременного замерзания.

Третья разновидность бетонирования с подачей теплоты — *обогрев воздуха*, окружающего бетон. Для этого устраивают фанерный или брезентовый тепляк, в котором устанавливают временные печи, специальные газовые горелки (при этом нужно строго соблюдать противопожарные правила), воздушное отопление (калорифе-

ры) или электрические отражательные печи. В тепляках ставят сосуды с водой, чтобы создать влажную среду для твердения, или поливают бетон. Этот способ дороже предыдущего и применяется при очень низких температурах, малых объемах бетонирования, а также при отделочных работах.

Кроме описанных выше способов зимнего бетонирования, требующих подогрева составляющих бетона или самого бетона, в нашей стране применяют *холодный способ* зимнего бетонирования, при котором материалы не подогревают, но в воду для приготовления бетона вводят большое количество солей, обеспечивающих твердение бетона на морозе.

Для различных расчетов по зимнему бетонированию (определение времени остывания бетона, требуемых свойств теплозащиты, средней температуры бетона и др.) широко используют уравнение теплового баланса, предложенное Б. Г. Скрамтаевым:

$$t = \frac{2500(t_{б.н}^{\circ} - t_{б.к}^{\circ}) + ЦЭ}{kM(t_{б.ср}^{\circ} - t_{в.ср}^{\circ})}, \quad (16.2)$$

где t — продолжительность остывания, ч; $t_{б.н}^{\circ}$ — температура свежееужоженного бетона; $t_{б.к}^{\circ}$ — температура бетона, до которой продолжается его остывание (для бетона без добавки в расчетах термосного выдерживания обычно принимают $t_{б.к}^{\circ} = 0^{\circ}\text{C}$); $Ц$ — расход цемента, кг/м³; $Э$ — тепловыделение цемента, кДж/кг; k — коэффициент теплопередачи от бетона через опалубку в окружающую среду, кВт/(м²·°C); M — модуль поверхности конструкции, $M = A/V$, м⁻¹; $t_{в.ср}^{\circ}$ — средняя температура воздуха за период остывания (по прогнозу погоды).

Коэффициент теплопередачи

$$k = 1 / \left(0,05 + \sum_{i=1}^n n_i / \lambda_i \right). \quad (16.3)$$

где h_i — толщина каждого слоя изоляции, м; λ_i — теплопроводность изоляционного слоя, кВт/(м·ч·°C). Теплопроводность для стали — 58, для сосны — 0,175, для снега — 0,35 Вт/(м·°C). Если опалубка воздухопроницаема, в ней имеются щели и неплотности, то значение коэффициента теплопередачи увеличивается в 1,5 ... 2 раза.

Тепловыделение портландцемента в возрасте 28 сут примерно составляет: для М500 — 500, М400 — 420, М300 — 340 кДж/кг. Шлакопортландцемент и пуццолановый цемент выделяют теплоты на 15 ... 20% меньше. Для ориентировочных расчетов принимают тепловыделение к определенному сроку пропорционально его относительной прочности. Например, для цемента М400 тепловыделение к возрасту 7 сут при нормальном твердении составит $0,6 \cdot 420 = 252$ кДж/кг.

Среднюю температуру бетона ориентировочно определяют в зависимости от модуля поверхности:

$$\text{при } M < 8 \quad t_{б.ср}^{\circ} = t_{б.н}^{\circ} / 2, \quad \text{при } M > 8 \quad t_{б.ср}^{\circ} = t_{б.н}^{\circ} / 3.$$

Более точные теплотехнические расчеты для зимнего бетонирования выполняются на основе современной теории тепло- и массообмена с использованием ЭЦВМ.

ГЛАВА 17

СБОРНЫЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОН

§ 17.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Широкое применение в строительстве получили сборные железобетонные детали и конструкции, изготовленные на заводах или полигонах и доставляемые на объекты строительства в готовом виде. За последние пятнадцать лет их производство увеличилось более чем в 50 раз, а использование на строительстве повысило производительность труда в 3 раза. Это было достигнуто благодаря тому, что применение крупноразмерных железобетонных элементов позволило основную часть работ по возведению зданий и сооружений перенести на завод с высокомеханизированным технологическим процессом.

Сборные железобетонные детали отличаются высоким качеством и долговечностью, не требуют специального ухода во время эксплуатации, их применение сокращает сроки строительства, уменьшает его трудоемкость, сокращает расход леса (так как отпадает необходимость в устройстве подмостей и опалубки) и металла (по сравнению со стальными конструкциями), упрощает производство работ в зимний период.

■ В настоящее время наиболее распространены следующие типы деталей: 1) железобетонные сваи (сплошные и пустотелые) для устройства оснований; 2) железобетонные и бетонные элементы сборных фундаментов (сплошные и пустотелые); 3) железобетонные колонны; 4) ненапряженные и предварительно напряженные железобетонные балки, прогоны и др.; 5) железобетонные панели и крупные блоки стен и перегородок; 6) ребристые и плоские плиты для междуэтажных перекрытий и кровельных покрытий, крупные панели, перекрывающие целую комнату или часть ее; 7) перемычки над окнами и дверными проемами; 8) железобетонные марши лестниц, ступени, косоуры, площадки, подоконники; 9) железобетонные и бетонные трубы для канализации, водопровода, дренажа, теплофикации, силовых кабелей и т. д.; 10) элементы сборных печей и дымоходов, изготовленные из бетона повышенной огнестойкости; 11) железобетонные тубинги

для шахт и тоннелей; 12) железобетонные арки и полуарки для покрытий сооружений; 13) шпалы для железных дорог, опоры и мачты для линий электропередачи, связи и освещения; 14) бетонные плиты для полов и тротуаров; 15) бетонные бортовые камни для дорог; 16) бетонные облицовочные плиты для стен.

В последние годы начато строительство домов из объемных элементов, каждый из которых представляет собой готовую комнату, часть квартиры или санузел. На заводах в специальных машинах формируют объемные элементы, затем выполняются отделочные работы, устанавливаются окна и двери, производится монтаж электро- и санитарно-технического оборудования. Работы на строительной площадке сводятся к установке блоков и соединению инженерных сетей.

Все больше применяются в строительстве предварительно напряженные железобетонные конструкции. Предельно допустимая растяжимость бетона в 5...6 раз меньше, чем у стали, поэтому в обычном железобетоне задолго до его разрушения появляются трещины и возникает опасность коррозии арматуры. Это не позволяет использовать полностью несущую способность арматуры, делает нецелесообразным применение арматуры из высокопрочной стали.

В предварительно напряженном железобетоне арматуру предварительно растягивают, а затем, после изготовления конструкции и затвердевания бетона, освобождают от натяжения. При этом арматура сокращается и вызывает сжатие бетона. В результате предельная растяжимость бетона в конструкции под действием эксплуатационной нагрузки как бы увеличивается, так как деформации от предварительного сжатия суммируются с деформациями растяжений. Предварительное напряжение арматуры не только предупреждает появление трещин в бетоне растянутой зоны конструкций, но и позволяет сократить расход арматуры, используя высокопрочную сталь и бетон, снизить массу железобетонных конструкций, повысить их трещиностойкость и долговечность.

§ 17.2. ФОРМОВАНИЕ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

На заводах производство сборного железобетона организуется по технологическим линиям с применением бетоноукладочных и уплотняющих машин. В одном потоке обычно изготавливают близкие по типам изделия, например в одном — панели, в другом — плиты перекрытий, в третьем — балки и прогоны. При изготовлении сборных железобетонных деталей на заводах производят следующие основные операции: изготовление арматурного каркаса и установку его в формы, формование изделий, прогрев для ускорения твердения бетона.

Арматурные каркасы на современных заводах изготавливают на высокопроизводительных станках. Для соединения стержней ис-

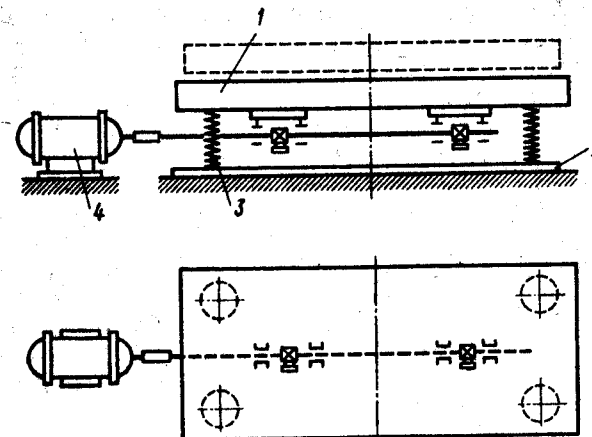


Рис. 17.1. Виброплощадка:

1 — платформа; 2 — основание; 3 — пружина; 4 — электродвигатель

пользуют точечную и стыковую сварки. В полевых условиях стальные стержни и прутки можно связывать в каркасы с помощью мягкой проволоки.

При изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций натяжение арматуры производят механическим или электротермическим способом. При механическом способе стержни или проволоку растягивают гидравлическим домкратом. При электротермическом, предложенном в Советском Союзе, используют свойство стали разогреваться и удлиняться при пропускании через нее электрического тока. Разогретый до 300...400 °С стержень закрепляют по концам, после охлаждения он оказывается растянутым (напряженным).

Перед формованием железобетонных изделий форму очищают, собирают и смазывают специальными составами, чтобы предотвратить прилипание бетона к ее стенкам. На заводах обычно применяют металлические формы, которые выдерживают до 1000 оборотов (при тепловой обработке). В полевых и полигонных условиях можно использовать деревянные формы, средняя продолжительность эксплуатации которых всего 20...30 оборотов. Применение строганных досок и окраска поверхности формы лаком или олифой увеличивает их оборачиваемость в два раза.

Формование изделий производят после установки в формы арматурного каркаса. Процесс формования включает укладку бетонной смеси в форму и ее уплотнение. Основным способом уплотнения бетонной смеси при производстве сборного железобетона является вибрирование. При изготовлении отдельных видов изделий применяют прессование, прокат, штампование, трамбование,

центрифугирование, набрызг. Иногда используют сочетание двух способов, например вибропрокат, виброштампование, или вибровакуумирование.

Формование изделий в передвижных формах обычно производят на виброплощадках (рис. 17.1). Виброплощадка состоит из платформы или рамы, к нижней части которой жестко прикреплен вал с дебалансами, соединенный с электромотором. Платформа опирается на пружины или специальные амортизаторы. При формовании изделия форма заполняется бетонной смесью из бункера бетоноукладчика постепенно, по мере уплотнения ее в процессе вибрирования. Оптимальная продолжительность вибрирования определяется опытным путем и составляет 1,5 ... 5 мин.

Заводы сборного железобетона оборудованы унифицированными площадками грузоподъемностью 2 ... 24 т с частотой 3000 кол/мин и амплитудой колебаний 0,3 ... 0,6 мм. Эти виброплощадки хорошо уплотняют жесткие бетонные смеси с расходом воды 130 ... 150 л/м³. Применение жестких бетонных смесей обеспечивает снижение расхода цемента, ускоряет твердение бетона, повышает качество готовых изделий. На виброплощадках формируют конструкции длиной до 15 м и шириной до 3,6 м.

Для лучшего уплотнения жестких бетонных смесей на виброплощадках, особенно при использовании легких пористых заполнителей, сила тяжести которых, способствующая уплотнению бетона при вибрировании, невелика, иногда применяют различные пригрузки: статический, вибрационный, пневматический, вибропневматический. Лучшими являются пневматический и вибропневматический пригрузки, которые повышая эффективность вибрирования, существенно не увеличивают нагрузку на виброплощадку и не снижают ее полезной грузоподъемности. Величина пригрузки назначается в зависимости от свойств бетонной смеси и составляет 2 ... 5 Па.

При формовании изделий в неподвижных формах для уплотнения бетонной смеси используют поверхностные и глубинные вибраторы, а также навесные вибраторы, которые крепят к форме. Подвижность бетонной смеси выбирается в зависимости от конструкции формы и характера армирования изделий. При изготовлении деталей в горизонтальных формах используют жесткие и малоподвижные бетонные смеси. При формовании изделий в вертикальных формах, например при изготовлении панелей стен и перегородок в вертикальном положении, применяют бетонные смеси с подвижностью 8 ... 10 см, так как малоподвижной смесью трудно хорошо заполнить глубокую и узкую форму.

Для изготовления труб и опор линий электропередачи используют центрифугирование, которое состоит в том, что бетонная смесь, загруженная в форму, подвергается быстрому вращению. Распределение и уплотнение бетонной смеси при этом способе происходит под действием не только центробежной силы, но и вибри-

рования, вызываемого сотрясением формы при вращении. При центрифугировании часть воды отжимается из бетона. Поэтому остаточное водоцементное отношение меньше первоначально взятого (при первоначальном В/Ц=0,3; 0,45; 0,6 остаточное В/Ц будет соответственно 0,26; 0,34; 0,36) и затвердевший бетон имеет высокую плотность (водопоглощение не более 3 %).

Для центрифугирования применяют подвижные бетонные смеси с осадкой конуса 7 ... 10 см и расходом цемента 350 ... 450 кг/м³. Загружают бетонную смесь с открытых торцов формы в течение 1,5 ... 2 мин. В это время форма, установленная на специальном станке, вращается с небольшой частотой (80 ... 150 об/мин), необходимой для равномерного распределения бетонной смеси по внутренней поверхности трубы. Затем частота вращения постепенно увеличивается до 800 ... 1000 об/мин. Уплотнение продолжается 8 ... 10 мин, после чего станок медленно останавливают, наклоняют форму и сливают разжиженный цементный шлам. Далее трубу в форме переносят краном в камеру твердения. После твердения трубу освобождают от формы и направляют на склад или дальнейшую обработку.

При изготовлении высоконапорных водопроводных труб на готовую железобетонную трубу навивают стальную проволоку по спирали с сильным натяжением. Спираль стягивает трубу, создавая в бетоне сжимающие напряжения, противостоящие рабочим растягивающим напряжениям. После навивки арматуры на поверхность трубы наносят (лучше всего пневматическим способом) защитный слой из цементного раствора.

§ 17.3 ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ

Твердение бетонных и железобетонных изделий на заводах при обычной температуре (15 ... 20 °С) нерационально, так как слишком продолжительно, уменьшает оборачиваемость форм, задерживает выпуск готовой продукции. Для ускорения твердения бетона применяют тепловую обработку.

■ Существуют следующие разновидности тепловой обработки: 1) пропаривание в камерах при температуре до 100 °С и нормальном давлении; 2) пропаривание в автоклавах при температуре около 175 °С и давлении около 0,8 МПа — наиболее быстрый способ твердения бетона; 3) электропрогрев; 4) контактный прогрев в обогреваемых формах; 5) прогрев изделий из легкого бетона в камерах с пониженной влажностью.

Наиболее широко применяют пропаривание в камерах. Здесь насыщенный пар создает тепловую и влажную среду, благоприятную для твердения бетона. Пропаривание бетона при атмосферном давлении производят в плотных (паронепроницаемых) кирпичных или бетонных камерах с герметически закрывающимися воротами или крышками. Загружают детали в эти камеры краном, на ваго-

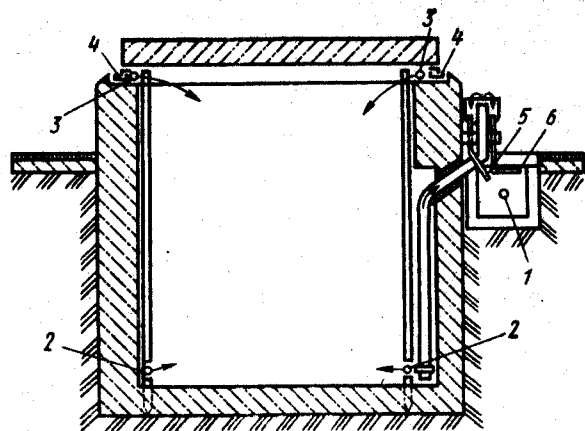


Рис. 17.2. Пропарочная камера системы Л. А. Семёнова:

1 — паропровод из котельной; 2 и 3 — верхняя и нижняя перфорированные трубы подвода пара; 4 — уплотнение; 5 — водопроводная труба; 6 — трубопровод подогретой воды

нетках или контейнером. Для пропаривания применяют насыщенный пар с температурой 80 ... 90 °С для бетона, содержащего обыкновенный портландцемент, и 90 ... 95 °С для бетона на шлакопортландцементе и пуццолановом портландцементе. Необходимая влажность среды обеспечивается в том случае, если пар подается из котла под низким давлением (0,07 МПа); если же пар подается под более высоким давлением, то для увлажнения его необходимо пропустить через воду. Повышают и понижают температуру в камерах постепенно.

В специальных герметизированных камерах (рис. 17.2), где обеспечена среда из чистого водяного пара, допускается пропаривание изделий при 100 °С, что еще более ускоряет твердение бетона.

На некоторых заводах применяют электропрогрев изделий. Имеется несколько способов электропрогрева: 1) внутренний прогрев за счет теплоты, выделяющейся при прохождении электрического тока через бетон; 2) обогрев изделий инфракрасными излучателями; 3) прогрев в электромагнитном поле; 4) применение контактных электронагревателей. Электропрогрев изделий способствует автоматизации и повышению культуры производства и является перспективным способом твердения бетона.

В южных районах для тепловой обработки бетона используют солнечную энергию. В этом случае на поверхность изделия устанавливают светопрозрачные элементы, герметизирующие форму. Элементы обычно имеют двойное остекление, чтобы предотвратить конденсацию пара на их поверхности и тем самым сохранить вы-

сокую светопропускную способность. В летний период изделие под действием солнечных лучей нагревают до 70 ... 80 °С и происходит как бы самопропаривание бетона.

Для экономии топлива при тепловой обработке изделий в последнее время используют отходящие газы ТЭЦ и других производств, усиливают теплоизоляцию пропарочных камер.

Большое значение для качества бетона при тепловой обработке имеет правильное назначение режима прогрева. Нагрев бетона сопровождается расширением его составляющих что может вызвать нарушение структуры неокрепшего бетона. В результате прочность прогретого бетона в возрасте 28 сут окажется ниже прочности бетона нормального твердения. Чтобы уменьшить отрицательное влияние этого фактора, применяют предварительное выдерживание бетона перед началом тепловой обработки.

Предварительная выдержка бетона до тепловой обработки повышает конечную прочность бетона, позволяет применять более форсированные режимы, что сокращает длительность тепловой обработки. Для бетонов из подвижных смесей рекомендуется выдержка в течение 3 ... 6 ч. Чем выше жесткость бетонной смеси и ниже В/Ц, тем короче предварительная выдержка. Введение добавок — ускорителей твердения сокращает, а поверхностно-активных добавок удлинит предварительную выдержку. Например, при введении в бетон до 0,2 % СДБ предварительную выдержку увеличивают до 4 ... 6 ч.

Предварительная выдержка необходима при прогреве изделий без форм или с большой открытой поверхностью. Если изделия находятся в герметичных формах или в кассетах, где металлическая, закрытая со всех сторон форма препятствует температурному расширению бетона, то предварительная выдержка не требуется и допустим быстрый подъем температуры. Более того, в формах сложной конструкции с большим количеством закладных деталей немедленный прогрев бетона сразу же после формирования полезен, так как иначе усадочные явления и деформации металла форм при прогреве могут вызвать появление в изделии трещин. Скорость нагрева бетона зависит от состава бетона, конструкции форм, вида изделия и других факторов. Она должна быть такой, чтобы свести к минимуму деструктивные процессы. Обычно для тонкостенных изделий скорость подъема температуры не должна превышать 25 °С/ч, для более массивных изделий — 20 °С/ч. Для изделий из жестких смесей с низким В/Ц (менее 0,45) скорость подъема температуры может составлять 30 ... 35 °С/ч, для изделий в закрытых металлических формах — 40 ... 60 °С/ч. Получение бетона высокого качества обеспечивается ступенчатыми режимами или режимами с прогрессивно возрастающей скоростью. В первом случае за 1 ... 1,5 ч температуру поднимают до 35 ... 40 °С, выдерживают изделия при этой температуре в течение 1 ... 2 ч, а затем за 1 ч поднимают температуру до температуры изотермического прогре-

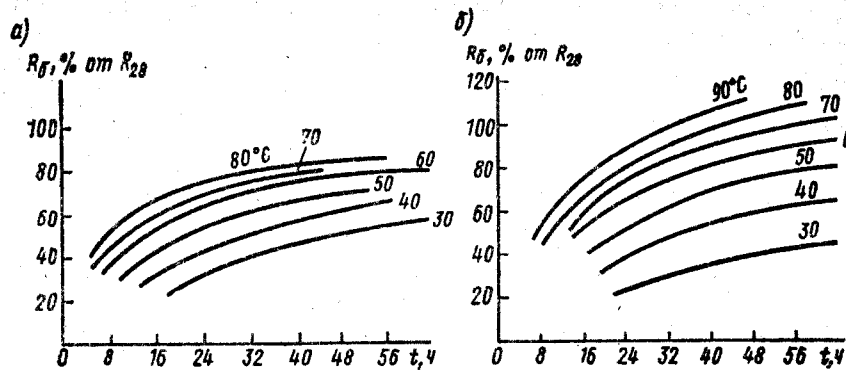


Рис. 17.3. Кривые нарастания прочности бетона при пропаривании:
а — для портландцемента; б — для шлакопортландцемента

ва. Во втором случае — до 15 ... 20 °С, дальше — на 20 ... 30 °С и так до максимальной.

Оптимальной температурой изотермического прогрева для бетона на портландцементе является температура 80 ... 85 °С. Дальнейшее повышение температуры не приводит к росту прочности бетона, хотя и может несколько ускорить его твердение в первые часы. При этом замедляется рост прочности после пропаривания, в результате пропаренный бетон в возрасте 28 сут имеет меньшую прочность, чем бетон нормального твердения. Для бетонов на портландцементе и пуццолановых цементах оптимальной является температура 90 ... 95 °С.

На рис. 17.3 приведены графики ориентировочных зависимостей относительной прочности бетона от температуры и длительности изотермического прогрева. По графикам можно назначать продолжительность изотермического прогрева. Скорость остывания бетона обычно не должна превышать 30 °С/ч, выгружать изделия из пропарочной камеры желательно при перепаде температур между поверхностью бетона и окружающей средой не более 40 °С, так как иначе в изделии могут возникнуть значительные деформации. После тепловой обработки изделия выдерживают в цехе в течение 4 ... 6 ч для остывания.

Для получения морозостойких бетонов следует применять более мягкие режимы: увеличивать предварительную выдержку, подъем температуры проводить со скоростью 10 ... 15 °С/ч, уменьшать температуру бетона со скоростью не более 10 ... 15 °С/ч.

Для устранения вредного влияния на структуру бетона температурного расширения составляющих при нагреве и для некоторого сокращения продолжительности тепловой обработки в последнее время на некоторых заводах практикуют предварительный разогрев бетона электрическим током или паром и формование изде-

лий из горячих бетонных смесей. При этом резко уменьшаются температурные градиенты в теле изделия, что способствует повышению качества бетона. В некоторых случаях можно ограничиться термосным выдерживанием, в других — применить более сокращенный режим прогрева для получения требуемой прочности.

Для прогрева бетонной смеси требуется следующее ориентировочное количество теплоты:

$$Q = V \rho_b' c (t_k^\circ - t_n^\circ), \quad (17.1)$$

где Q — количество теплоты, кДж; V — объем разогреваемой бетонной смеси, м³; ρ_b' — плотность бетонной смеси, кг/м³; c — удельная теплоемкость бетонной смеси, ориентировочно принимаемая 1,05 кДж/(кг·°С); t_k° — конечная температура разогрева (обычно 80 ... 90 °С, но иногда и меньше, если бетон нагревается до более высоких температур уже непосредственно в форме), °С; t_n° — начальная температура бетонной смеси, °С.

Экзотермией цемента при быстром начальном разогреве можно пренебречь. В среднем для разогрева 1 м³ бетонной смеси требуется примерно 125 ... 170 МДж. При разогреве бетонной смеси электрическим током требуемая мощность P (Вт) определяется по формуле

$$P = Q / (0,864t), \quad (17.2)$$

где t — продолжительность разогрева, ч.

При разогреве бетонная смесь загустевает (рис. 17.4). Наиболее заметно густеют смеси на высокоалюминатных цементах. Соответственно изменяются и сроки схватывания бетона. Кроме того, для получения заданной подвижности необходимо увеличивать расход воды на 10 ... 15 %. Это хотя и в меньшей степени, чем в обычных смесях, но снижает прочность бетона. Для сохранения заданной прочности бетона приходится несколько повышать расход цемента.

Применение комплексных добавок, состоящих из компонентов, ускоряющих разогрев и твердение, а также пластифицирующих бетонную смесь, позволяет в ряде случаев получить бетоны с тем же расходом цемента, что при обычном изготовлении изделий.

Наращение прочности горячих бетонных смесей зависит от температуры разогрева и выдерживания, водоцементного отношения и других факторов. Обычно рост прочности предварительно разогретого бетона в раннем возрасте происходит более быстро, чем при пропаривании, а затем выравнивается и при обычно применяемых режимах, когда требуется получить 70 % от марочной прочности, сокращение продолжительности тепловой обработки при горячем формовании не превышает 10 ... 15 % (с учетом применения бетонов повышенной водопотребности). Для ориентировочной оценки роста прочности предварительно разогретого бетона могут служить графики (рис. 17.5), составленные по результатам опытов Л. М. Зголич.

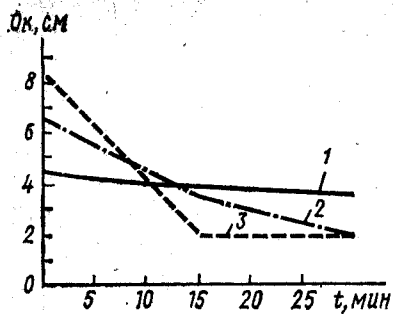


Рис. 17.4. Влияние времени выдержки t на изменение подвижности горячих бетонных смесей на цементах:

1 — низкоалюминатных; 2 — среднеалюминатных; 3 — высокоалюминатных

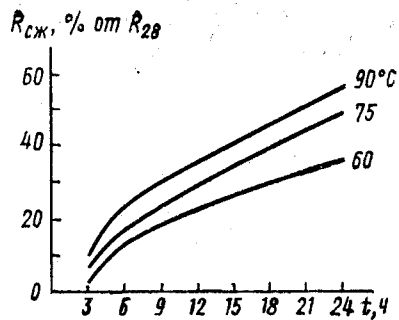


Рис. 17.5. Кривые нарастания прочности предварительно разогретого бетона при термосной выдерживании

В зависимости от применения различных цемента, продолжительности и температуры пропаривания прочность бетона после прогрева достигает 70 ... 100 % от 28-суточной прочности бетона, твердеющего в нормальных условиях. Наибольшая относительная прочность бетона при одинаковой продолжительности прогрева получается при использовании пуццоланового портландцемента и шлакопортландцемента, меньшая — обыкновенного портландцемента. После получения 70 ... 100 % расчетной прочности бетона сборные детали можно отправлять на объекты строительства для монтажа.

§ 17.4. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

На заводах сборного железобетона применяют три схемы производства.

■ **Изготовление изделий в стационарных неподвижных формах — стендовый способ.** При стендовом способе изделия изготавливают в формах, устанавливаемых на бетонных площадках с ровной поверхностью, либо в матрицах, представляющих отпечаток поверхности изделия сложной конфигурации. Изделия подвергают тепловой обработке непосредственно в форме. При кассетном способе формование и твердение изделий происходят в вертикальной форме — кассете, которая состоит из ряда отсеков для изделий, образованных стальными или железобетонными вертикальными стенками (рис. 17.6). Формование изделий в вертикальном положении резко сокращает производственные площади, что является основным преимуществом кассетного способа. Кассета имеет спе-

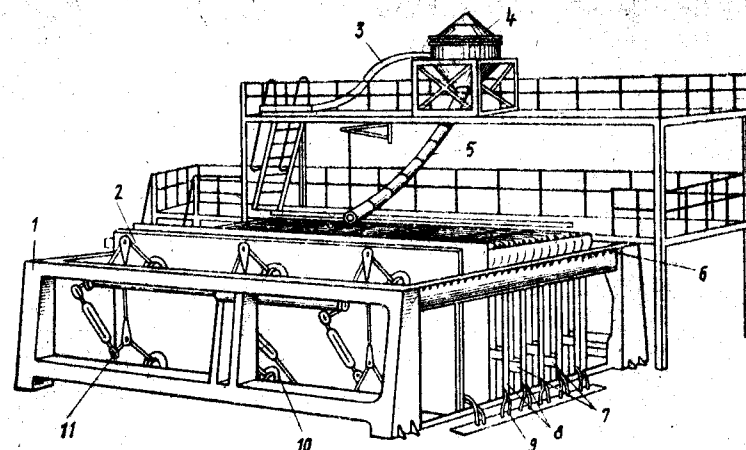


Рис. 17.6. Кассетно-формовочная машина:

1 — рама; 2 — опоры для обжатия кассеты; 3 — бетонопровод для пневмотранспорта бетонной смеси; 4 — гаситель (циклон) для бетонной смеси при пневмотранспорте смеси; 5 — гибкий шланг для загрузки смеси в формы; 6 — роликовые опоры разделительных стенок; 7 — навесные вибраторы; 8 — вертикальные разделительные стенки кассеты; 9 — подводка для пара в тепловые отсеки; 10 — гидроцилиндр для привода распорных рычагов; 11 — рычажная система для сборки и разработки кассеты

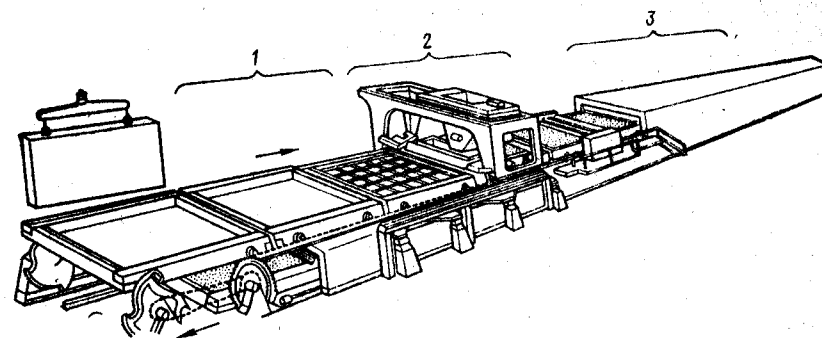


Рис. 17.7. Двухъярусный стан для изготовления сборных железобетонных изделий: 1 — пост подготовки форм и установки арматуры; 2 — пост формования; 3 — камера тепловой обработки

циальные паровые рубашки для обогрева изделий. Может проводиться также электропрогрев изделий.

■ **Изготовление изделий в формах, перемещаемых по отдельным технологическим постам.** Различают конвейерный способ с максимальным расчленением технологических операций и поточно-агрегатный, при котором выполнение нескольких операций совмещается на одном посту. Конвейерный способ обеспечивает высокую механизацию и производительность труда.

Высокие показатели получены на двухъярусных станах (рис. 17.7). Непрерывно движущаяся цепь перемещает формы. На верхнем ярусе производится формование изделий и предварительное твердение бетона в щелевой камере, где осуществляется интенсивный прогрев изделий паром, специальными подогревателями или инфракрасными лампами. На нижнем ярусе происходит окончательное твердение бетона.

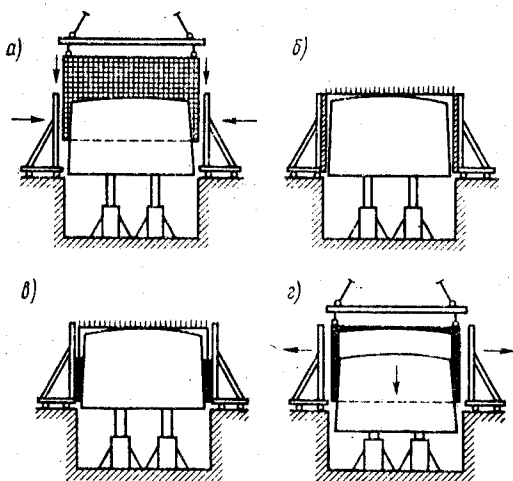


Рис. 17.8. Схема формования объемных блоков:

а — установка арматуры; б — сборка формы перед бетонированием; в — бетонирование стен блока; г — съем готового блока

стана достигает 80 м² панелей, однако при этом способе затруднен переход на выпуск новых видов изделий. Стоимость изделий выше, чем при изготовлении их другими способами.

■ **Производство объемных элементов** (рис. 17.8). При формовании объемных блоков на установке типа «колпак» вначале при отодвинутых наружных щитах устанавливают арматурный каркас, затем щиты сдвигают и бетонируют стены и потолок блока. Прогрев изделия осуществляют на месте с помощью нагрева сердечника. Для съема готового блока сердечник опускают вниз.

Разные типы изделий, а также схемы производства сборного железобетона требуют применения большого разнообразия составов бетона и материалов для его приготовления. В гл. 11 ... 14 рассмотрены способы проектирования состава бетона различных видов. С каждым годом разнообразие конструкций, способов производства и применяемых бетонов увеличивается, однако основные принципы выбора бетона, определения его состава и контроля качества сохраняются, в них только вносятся необходимые дополнения, учитывающие конкретный случай производства.

§ 18.1 ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для получения бетонов высокого качества и экономичности необходимо проводить постоянный контроль за их производством и на его основе управлять технологическими процессами, внося в них необходимые изменения и коррективы, учитывающие колебания свойств исходных материалов и условий производства и гарантирующие получение заданных свойств бетона при минимальных материальных, энергетических и трудовых затратах.

● **Контроль организуется на всех стадиях производства бетона и изделий из него и включает контроль свойств исходных материалов, приготовление бетонной смеси и ее уплотнение, структурообразование и твердение бетона и свойств готового материала или изделия** (табл. 18.1). Для контроля используют различные способы и приборы. По полученным результатам вносят коррективы в состав бетона, в параметры и режимы технологических операций на основе закономерностей, учитывающих влияние на свойства готового бетона различных технологических факторов. Для большей точности и надежности управления качеством бетона используют зависимости, полученные для условий конкретного производства. Эти зависимости должны постоянно корректироваться по результатам статистического контроля свойств бетона.

Для управления производством и качеством бетона используют вычислительную технику и автоматизированные системы управления. Для их работы требуется соответствующее математическое обеспечение, в частности использование математических моделей, которые связывают свойства бетона с качеством используемых материалов, составом бетона и условиями производства.

Управление качеством бетона осуществляется на основе поперационного контроля производства. Для его проведения используют экспресс-методы, позволяющие быстро оценить свойства материала или параметры процесса, разрабатываются специальные полуавтоматические и автоматические средства, а также используется выборочная проверка объектов контроля. Для оценки свойств цемента предложены рентгенографические и другие методы экспресс-анализа его минералогического состава и способы быстрого определения удельной поверхности цемента. По их результатам прогнозируется возможное влияние качества цемента на свойства приготавливаемой бетонной смеси и бетона и при необходимости производятся изменения состава бетона и режима технологических операций. Необходимое быстрое действие обеспечивается обработкой результатов на ЭВМ по специальной программе. На Харьковском домостроительном комбинате создана одна из первых установок

Таблица 18.1. Производственный контроль на заводе сборного железобетона

№ п/п	Этапы производственного фонда	Объект контроля	Этапы контроля
1	Приемка материалов	Цемент, добавки, заполнители	Определение физико-механических свойств
2	Производство полуфабрикатов	Бетонная смесь	Контроль за точностью дозирования, продолжительностью перемешивания и степенью подвижности (жесткости)
3	Формование изделий	Арматурные каркасы	Проверка размера каркасов, прочности сварных стыков
		Формы и опалубка	Проверка правильности сборки форм, качества опалубки, качества смазки форм
		Подготовка к бетонированию	Проверка положения арматурных каркасов и закладных частей, контроль степени напряжения арматуры
4	Тепловлажностная обработка	Бетонирование	Контроль за укладкой, продолжительностью и степенью уплотнения бетонной смеси
		Режим теплообработки	Контроль температуры, влажности и продолжительности теплообработки
5	Распалубка изделий	Готовое изделие	Контроль формы и размеров изделия, качества отделки
6	Прием изделий ОТК на склад готовой продукции выдача потребителю	Контрольные кубы Готовые изделия	Определение прочности бетона, водонепроницаемости и морозостойкости Определение прочности бетона приборами без разрушения, прочности, жесткости натурными испытаниями, толщины защитного слоя

по экспресс-оценке цемента и учету этого фактора в производстве. Качество заполнителя оценивают стандартными методами. Влажность заполнителя может определяться электрофизическими и радиационными методами. Влияние заполнителя на свойства бетонной смеси сравнительно просто можно установить по результатам непосредственного испытания смеси: по ее сопротивлению перемешиванию или по оценке ее подвижности.

Для автоматического контроля подвижности бетонной смеси предложены различные приборы. Автоматический регулятор вязкости, разработанный в НИИЖБе, основан на замере сопротивления движению в бетонной смеси вибрирующих лопастей, в приборе А. Г. Бойко подвижность бетонной смеси оценивают по электрической мощности, затрачиваемой на преодоление вязкого сопротивления смеси погруженного в нее специального цилиндра. Наиболее удобно судить о подвижности бетонной смеси по изменению мощности электродвигателя бетоносмесителя. Последний способ по-

зволяет контролировать качество перемешивания бетонной смеси. С повышением ее однородности улучшается ее подвижность и понижается расходуемая мощность электродвигателя (рис. 18.1).

Большинство используемых для автоматического контроля способов являются косвенными, и на показания приборов влияет не только подвижность бетонной смеси, но и состав бетона и ряд других факторов, поэтому эти способы должны основываться на достоверных тарировочных зависимостях, устанавливаемых для каждого конкретного случая предварительными испытаниями.

Для контроля уплотнения бетонной смеси часто используют методы, основанные на применении γ -излучения и уменьшении электрического сопротивления смеси (рис. 18.2). Поскольку эти характеристики и их изменения будут зависеть от состава бетона и других факторов, здесь также необходимо проведение предварительных экспериментов.

За изменением прочности бетона в процессе твердения можно следить по изменению показаний ультразвуковых приборов. Повышение прочности бетона связано с ростом количества новообразований цементного камня и увеличением его плотности, что приводит к повышению скорости прохождения ультразвука через бетон (рис. 18.3). Контроль прочности бетона производится стандартными методами. В процессе производства прочность бетона оценивают разрушающими методами.

■ При производстве железобетонных конструкций контролируются: 1) отпускная прочность бетона — для сборных конструкций без предвари-

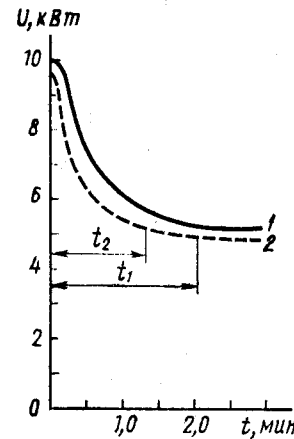


Рис. 18.1. Изменение значения мощности, расходуемой электродвигателем смесителя в процессе перемешивания:

1 — при обычном перемешивании; 2 — при перемешивании смеси с добавкой ПАВ, равноподвижной смеси 1

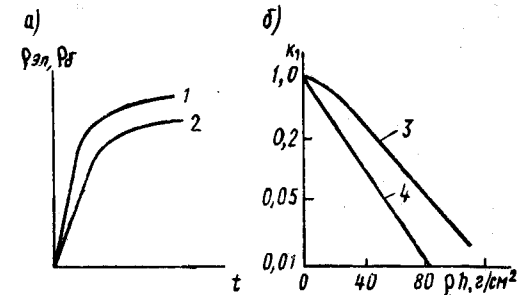


Рис. 18.2. Контроль степени уплотнения бетонной смеси:

а — по изменению электропроводности бетонной смеси в процессе ее уплотнения; б — радиоизотопным методом; 1 — изменение электрического сопротивления бетонной смеси в процессе уплотнения; 2 — изменение плотности бетонной смеси; 3 — ослабление излучения в широком пучке; 4 — то же, в узком пучке

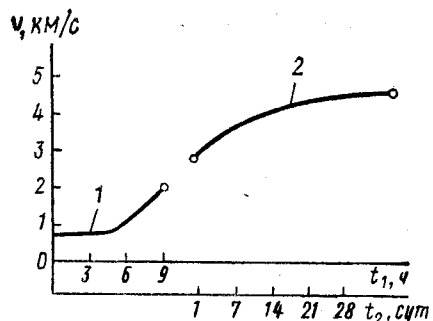


Рис. 18.3. Изменение скорости ультразвука в процессе твердения бетона: 1 — в период затвердевания бетонной смеси; 2 — в период твердения бетона

отпускная или передаточная прочность более 90 % от установленной для данного класса, то контроль прочности в проектном возрасте не производят. Контроль прочности ведут с использованием данных контроля предыдущих партий. На основе этого контроля определяют характеристики однородности прочности бетона и требуемую прочность бетона для последующего контролируемого периода. Прочность бетона в контролируемой партии R_m сравнивают с требуемой R_T . Если $R_m \geq R_T$, то партия конструкций принимается.

Определение прочности бетона в партии производят на основе испытания контрольных образцов бетона или неразрушающими методами. В состав партии включают бетон сборных или монолитных конструкций, формируемых из бетонной смеси одного состава в течение не менее одной смены и не более одной недели. Для контроля отбирают не менее двух проб в смену для сборных конструкций и в 1 сут для монолитных конструкций. Из каждой пробы изготавливают по одной серии образцов для контроля отпускной, передаточной, промежуточной и проектной прочности. Контрольные образцы бетона сборных конструкций должны твердеть в одинаковых с конструкциями условиях до определения отпускной или передаточной прочности.

Для контроля неразрушающими методами от партии отбирают 10 %, но не менее трех сборных конструкций. При возведении монолитных конструкций контролируют не менее одной конструкции (или ее части) из объема бетона, уложенного в течение каждых суток. Для каждой сборной конструкции назначают не менее двух, а для монолитной — не менее четырех контролируемых участков. Обычно выбирают по участку на каждые 4 м длины для линейных конструкций и 4 м² площади для плоских конструкций (для монолитных сплошных стен — на 8 м² площади).

Для получения высокого качества бетона важное значение име-

ет точность технологических операций, которая должна обеспечивать выполнение требований стандарта и технологических регламентов. Эти требования должны соответствовать возможностям используемых в технологии механизмов и аппаратов.

На заводах сборного железобетона постоянно должны проводиться мероприятия по повышению качества продукции и производиться ее аттестация. Особое внимание должно обращаться на узловые вопросы, определяющие качество изделий. Важное значение имеет состояние форм. Содержание форм в чистоте, систематическая проверка их состояния, использование доброкачественной смазки — все это способствует повышению качества продукции.

Распространенным дефектом железобетонных изделий является отклонение установленной арматуры и закладных деталей от проектного положения. В результате ухудшаются технические свойства изделия, затрудняется монтаж на строительной площадке. Поэтому необходимо предусматривать принудительную надежную фиксацию арматуры и закладных деталей в формах.

Для уменьшения металлоемкости изделий особое внимание следует уделять конструкции и способам крепления закладных деталей. Очень часто эти детали излишне массивны и громоздки. Необходимо предусматривать переход на закладные детали из профилированного металла, по возможности сокращать количество закладных деталей, вместо тяжелых петель применять съемные устройства для транспортировки и монтажа изделий.

Решающее значение для качества и надежности сборного железобетона имеет качество бетона. Организация пооперационного контроля за его изготовлением и применение неразрушающих или других способов контроля прочности бетона является обязательным условием получения изделий высокого качества. На производстве необходимо проводить систематический контроль за состоянием дозаторов и бетоносмесителей, за соблюдением длительности перемешивания, применять такие способы транспортировки бетонной смеси, которые не приводят к ее расслаиванию.

При укладке бетонной смеси следует не допускать ее падения с большой высоты, применять смеси, технологические свойства которых соответствуют параметрам вибрационного или другого уплотняющего оборудования, систематически проверять амплитуду и частоту колебаний виброоборудования, так как его загрязнение, налипание на нем бетона могут привести к ухудшению его рабочих параметров.

В мероприятиях необходимо предусмотреть обеспечение хорошего качества поверхности изделия. При отсутствии специальных механизмов открытая поверхность бетона получается излишне шероховатой, особенно при применении слишком жесткой бетонной смеси. Это ухудшает внешний вид, часто приводит к нарушению заданной толщины изделий и увеличивает трудоемкость работ на строительстве при сооружении отдельных сборных элементов.

Поэтому в технологии следует предусматривать соответствующие отделочные устройства и такую организацию производства, которая гарантировала бы хорошее качество открытой поверхности изделия. Для этого необходимо обеспечивать равномерное распределение бетонной смеси при ее укладке, эффективную вибрацию при уплотнении, применение пригруза или специальных заглаживающих устройств, виброрейки, вращающегося ролика, дисковой заглаживающей машины, шлифовальных кругов.

Для получения высокого качества поверхностей изделий, прилегающих к форме, следует хорошо очищать и смазывать формы, применять специальные смазки, пластифицировать бетон, использовать отделочные и подстилающие составы, обеспечивать хорошее соответствие между подвижностью бетонной смеси и параметрами вибрации, избегать применения слишком жестких бетонных смесей.

Заданные размеры изделий обеспечиваются образцовым содержанием парка форм, так как от состояния последних зависит, насколько размеры изделий будут соответствовать проекту. Необходимо систематически проверять размеры изделий и форм. При проектировании форм следует учитывать технологические деформации, т. е. деформации, возникающие при натяжении арматуры, температурные и другие виды деформаций.

Необходимо предусматривать мероприятия, обеспечивающие сохранение высокого качества изделий после их изготовления. Бетон является хрупким материалом, поэтому при небрежном хранении и транспортировке в изделиях легко могут появиться дефекты — отколы углов и кромок, трещины и др. Во избежание этого следует содержать в порядке транспорт, складировать изделия с выполнением всех предупредительных мер — установкой специальных прокладок в соответствующих местах, применять при погрузке специальные захваты, использовать соответствующим образом оборудованные транспортные средства.

§ 18.2. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА БЕТОНА

Для более полного контроля за качеством бетона в изделиях недостаточно обычных стандартных методов испытаний. Контрольные образцы, как бы точно ни соответствовало их изготовление условиям производства, имеют другие размеры, что сказывается на условиях их формирования и твердения, и поэтому они оценивают свойства бетона в изделии лишь с определенной степенью приближения.

● В настоящее время широко используют неразрушающие методы контроля прочности бетона, которые позволяют ориентировочно определить прочность в любой конструкции или на отдельном участке конструкции или изделия без их разрушения. Нераз-

рушающие методы контроля прочности бетона условно можно разделить на две группы: механические, или поверхностные, и физические. В *механических методах* поверхность изделия или образца подвергается определенному виду, как правило, механического воздействия и о прочности бетона судят по сопротивлению, которое он оказывает этому воздействию. Для проведения подобных испытаний обычно применяют сравнительно несложные приборы и приспособления. *Физические методы* основываются на оценке прочности бетона по скорости прохождения через него ультразвука или по регистрации колебаний и других физических величин, которое производится с помощью сложных физических приборов. Эти методы позволяют определять прочность не только поверхностных, но и глубинных слоев бетона, выявлять внутренние дефекты в изделии, возникшие в процессе производства, при эксплуатации или в ходе испытания. Используемые при испытании приборы обладают быстродействием и легко могут быть соединены с электронно-вычислительными машинами в единый испытательный комплекс.

С помощью неразрушающих методов может быть организован сплошной контроль за качеством бетона путем его испытания непосредственно во время и после изготовления изделия и внесения необходимых коррективов в производственный процесс для обеспечения постоянного высокого качества продукции. На основе этих методов создаются автоматизированные системы контроля качества бетона, которые входят в общий комплекс управления производством на заводах сборного железобетона.

Построение тарировочных зависимостей. В неразрушающих методах контроль прочности бетона производится косвенным путем по определению степени его сопротивления механическому воздействию на поверхность изделия, по твердости, скорости прохождения звука, величине возбуждаемых при ударе колебаний и другим характеристикам, которые можно получить без разрушения изделия или образца. Для определения прочности бетона в этих случаях используют тарировочные зависимости, связывающие прочность бетона с показателями, получаемыми при данном методе испытания. Эти зависимости выявляются путем предварительных испытаний по выбранному методу и по стандарту и обычно для удобства пользования выражаются в виде графиков.

Для получения достоверных зависимостей и определения точности испытания необходимо провести не менее 50 предварительных опытов. По результатам испытаний устанавливают величину среднеквадратического отклонения s при определении прочности бетона по тарировочной кривой:

$$s = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta R_1}{\Delta R_{T1}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta R_n}{\Delta R_{Tn}}\right)^2}{n}}, \quad (18.1)$$

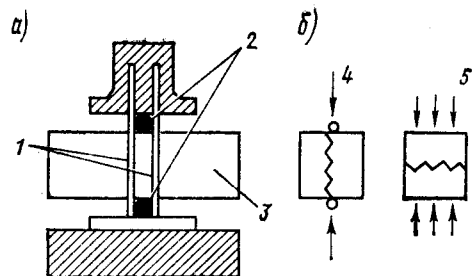


Рис. 18.4. Испытание бетонных образцов раскалыванием:

a — приспособление для центрирования образца; *b* — определение прочности при растяжении и сжатии на одном образце; 1 — направляющие стержни; 2 — раскалывающие стержни; 3 — образец; 4 — положение образца при раскалывании; 5 — положение образца при сжатии

более высокую точность показывают при испытании бетонов средних и низких марок, а методы, основанные на упругом отскоке бойка от поверхности бетона, достаточно точно контролируют прочность бетонов высоких марок. При выборе метода следует учитывать его надежность для данных условий, а при изменении состава бетона, технологии изготовления изделия и условий испытаний тарировочные зависимости следует проверять и вносить в них при необходимости соответствующие коррективы.

Стандартные методы определения прочности бетона при сжатии были рассмотрены в гл. 5. В некоторых случаях представляет интерес определение прочности бетона на растяжение. По этой прочности можно судить о прочности бетона на сжатие, так как известно, что между ними существует ориентировочная зависимость

$$R_p = k_p^3 \sqrt[3]{R_{сж}^2}, \quad (18.2)$$

где k_p — коэффициент, для обычного бетона $k_p \approx 0,5$, мелкозернистого $k_p \approx 0,55$.

Испытание на осевое растяжение очень трудоемко и требует специальных образцов, поэтому на практике часто пользуются упрощенным методом определения прочности бетона путем его раскалывания. В этом случае прочность на растяжение

$$R_{p,p} = 2P/(\pi a^2) = 0,636P/a^2, \quad (18.3)$$

где P — разрушающая нагрузка, кН; a — сторона куба, см.

При испытании образцов раскалыванием необходимо прикладывать нагрузку в узких полосах сверху и снизу образца с помощью проволочек, стержней (рис. 18.4, *a*) или другого раскалывающего приспособления. Результат испытания в некоторой степени

зависит от ширины полосы приложения нагрузки, например при диаметре стержня $d=14$ мм $R_{p,p}=2,4$ МПа, при $d=10$ мм $R_{p,p}=2,2$ МПа, при $d=2 \dots 5$ мм $R_{p,p}=1,9$ МПа. Определение $R_{p,p}$ следует производить при минимальных диаметрах проволоки $2 \dots 5$ мм.

При испытаниях низкопрочного и легкого бетонов может оказаться невозможным применение проволоки очень малых диаметров, так как в этом случае наблюдается местное смятие бетона и проволока частично утапливается в поверхность образца. Если диаметр проволоки будет очень малым, то возможно почти полное ее вдавливание в бетон и тогда к растягивающим усилиям могут добавиться сжимающие усилия плит пресса, особенно если образец имеет недостаточно точные размеры и форму, поэтому диаметр проволоки надо выбирать таким образом, чтобы избежать подобного явления. Обычно диаметр 5 мм — оптимальный, и он обеспечивает достаточную точность результатов испытаний.

При испытании образцов раскалыванием большое значение имеет правильность приложения нагрузки. Для центрирования образцов и проволок могут применяться специальные приспособления (рис. 18.4, *a*).

Ориентировочно оценить прочность бетона на сжатие и растяжение можно путем испытания одного образца. Для этого образец сначала раскалывают с помощью проволочек на специальном кондукторе для определения прочности на растяжение, затем половинки куба тщательно складывают, добиваясь их первоначального положения, и испытывают на сжатие (рис. 18.4, *b*). При этом плоскость раскола располагается перпендикулярно действующей нагрузке. Опыты показали, что при таком испытании предел прочности при сжатии в среднем составляет 0,95 предела прочности, полученного стандартными испытаниями.

Прочность бетона в образцах неправильной формы, полученных непосредственно из изделия, определяют методом двойных штампов (рис. 18.5). Если образец не имеет параллельных поверхностей, то с помощью раствора выравнивают две противоположные грани блока. Чтобы обеспечить большую точность испытаний, необходимо добиваться правильной центровки штампов на прессе.

Механические методы контроля качества бетона. Известно большое количество методов определения прочности бетона путем механического воздействия на поверхность образца или изделия. Эти методы в зависимости от особенностей воздействия можно подразделить на три группы.

К *первой группе* относят методы, основанные на определении прочности бетона по усилию, необходимому для отрыва и скалывания куска бетона с поверхности конструкции или изделия. Наиболее старый метод — выдергивание заранее заделанного в бетон стержня. Стержень изготавливают из арматуры периодического профиля или устраивают на его конце специальное уширение для хо-

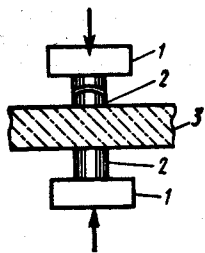


Рис. 18.5. Испытание бетона штампами:

1—плиты прессы; 2—штампы; 3—образец

рошего сцепления с бетоном. При выдергивании такого стержня вместе с ним выкалывается кусок бетона. Испытание проводят с помощью специального устройства на основе гидравлического домкрата с измерителем усилий, необходимых для выдергивания стержня. По этому усилию судят о прочности бетона. Метод сравнительно прост, но требует постановки стержней до бетонирования, что несколько усложняет изготовление изделий и их ремонт после испытания. Установка стержней доступна в основном на открытых поверхностях бетона.

Метод, основанный на отрыве от бетона специальной шайбы с хвостиком, не требует каких-либо дополнительных мероприятий при изготовлении изделий. Шайбы приклеивают эпоксидным клеем к поверхности готового изделия в любом месте. После затвердевания клея шайбы отрываю от бетона с помощью специального устройства. Так как прочность на отрыв эпоксидного клея выше прочности бетона на растяжение, то вместе с шайбой отрывается кусок бетона. Можно также оторвать кусок бетона с помощью разжимного конуса, вставляемого в заранее подготовленное отверстие.

При испытании на выдергивание или отрыв зависимость прочности при сжатии R_6 (МПа) от усилия отрыва $P_{отр}$ (кН) обычно имеет прямолинейный характер:

$$R_6 = AP_{отр} - B, \quad (18.4)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты.

Для стержней с уширением на конце при глубине заделки 50 мм и диаметре стержня 10 мм коэффициенты $A=0,1$; $B=0$.

При испытании на отрыв приклеиваемых шайб можно использовать зависимость

$$R_6 = AP_{отр}/A_1 + B = AR_{отр} + B, \quad (18.5)$$

где $R_{отр}$ — прочность отрыва, МПа; A_1 — площадь отрыва, см².

Для обычного бетона при диаметре дисков 60 мм можно принять $A=20$, $B=30$. С уменьшением диаметра дисков значение $R_{отр}$ для одного и того же бетона увеличивается, поэтому при определении его прочности необходимо вводить понижающие поправочные коэффициенты, которые будут зависеть от диаметра шайбы и свойств бетона.

Вторая группа механических испытаний основана на измерении твердости бетона, осуществляемом путем вдавливания в его поверхность штампа определенной формы, чаще всего шарообразной. Вдавливание штампа производят ударом, с помощью пружины или

другими способами. В результате воздействия на поверхности бетона образуется вмятина, размеры которой являются показателем твердости бетона. При применении шарообразного штампа получают сферический отпечаток. Прочность бетона устанавливают в зависимости от диаметра отпечатка по тарировочной кривой, построенной по результатам предварительных испытаний. Диаметр отпечатка в этом случае характеризует твердость бетона. Для получения наиболее точных результатов измерения требуется, чтобы диаметр отпечатка был более $0,2D$ и менее $0,6D$, где D — диаметр шарика. Если диаметр отпечатка больше указанных пределов, то следует уменьшить силу вдавливания; если диаметр отпечатков меньше указанных пределов, то применяют шарик меньшего диаметра.

Наиболее простой прибор — шариковый молоток конструкции И. А. Физделя, на одном конце которого установлен шарик диаметром 17,46 мм. Испытания производят ударом молотка по бетону и замером диаметра отпечатка. На показатель твердости бетона влияет сила удара, а при применении шарикового молотка трудно обеспечить одинаковую силу удара, поэтому этот метод дает большой разброс результатов.

Сравнительно удобны пружинные молотки, которые вдавливают шарик в бетон с помощью предварительно сжатой пружины. При спуске пружины специальный боек ударяет по бетону. По диаметру отпечатка судят о прочности бетона. Специально оттарированная пружина обеспечивает постоянство силы удара, что повышает точность испытания. Однако в переносных небольших по размерам приборах трудно с помощью пружины обеспечить значительную силу удара, что затрудняет испытание высокопрочных бетонов.

Наиболее точными являются методы, когда при ударе получается два отпечатка: на бетоне и на эталоне, в качестве которого чаще всего используют сталь с заранее установленным показате-

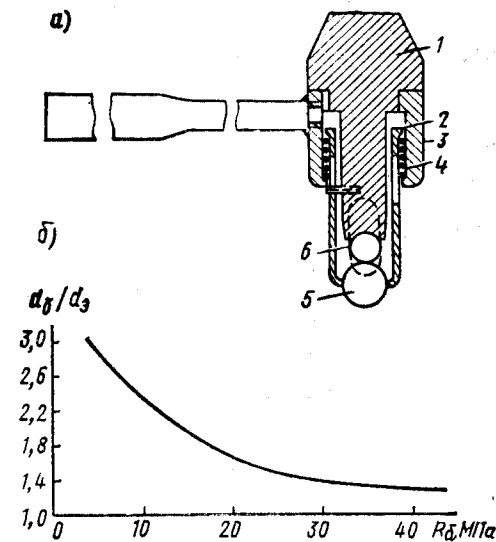


Рис. 18.6. Испытание эталонным молотом Кашкарова:

а — общий вид: 1 — головка; 2 — стакан; 3 — корпус; 4 — пружина; 5 — шарик; 6 — эталонный стержень; б — тарировочная зависимость

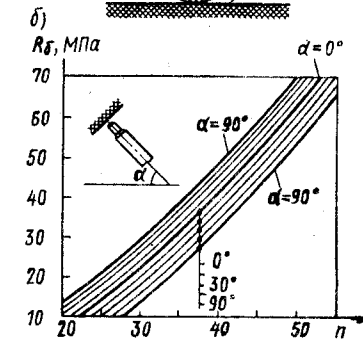
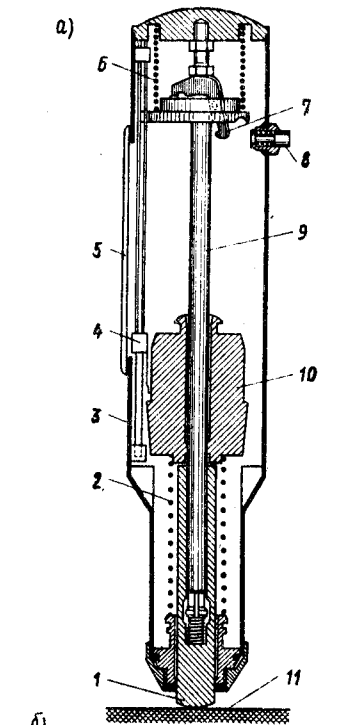


Рис. 18.7. Испытание молотком Шмидта:

a—схема молотка: 1—ударник; 2—возвратная пружина; 3—корпус; 4—указатели высоты отскока бойка; 5—измерительное устройство; 6—пружина; 7—защелка; 8—спусковая кнопка; 9—шток; 10—боек; 11—образец бетона; *b*—тарировочные кривые; *n*—показания прибора

лем твердости. Принцип действия подобных приборов показан на примере получившего широкое распространение эталонного молотка конструкции К. П. Кашкарова (рис. 8.16, *a*). В этом молотке стальной шарик диаметром 15 мм при ударе оставляет отпечатки одновременно на бетоне и эталоне, поэтому сила удара в малой мере влияет на результаты испытания, если размер отпечатка на бетоне лежит в указанных выше пределах. В стакане молотка между его корпусом и шариком имеется отверстие, в которое вставляют эталонный стержень из круглой прутковой стали Ст3 диаметром 10 мм. Размер отпечатка на эталоне имеет форму эллипса, поэтому его измеряют по длинной оси вдоль образующей стержня. После каждого удара эталонный стержень, прижимаемый к шарiku между ударами с помощью пружинного устройства, передвигают на 10 мм. Расстояние между отпечатками на бетоне должно превышать 30 мм. Диаметры лунок измеряют с точностью до 0,1 мм.

Прочность бетона определяют по тарировочной кривой в зависимости от отношения d_6/d_{3r} (рис. 18.6, *b*). Тарировочная кривая составлена для бетона в возрасте 28 сут с влажностью 2...6%. При других условиях испытания необходимо вводить поправочные коэффициенты или применять свои тарировочные зависимости.

К *третьей группе* относят приборы, основанные на принципе упругого отскока. В этих приборах измеряют высоту упругого бойка, падающего с постоянной высоты. Ударная твердость бетона связана с его прочностью; с повышением прочности возрастают ударная твердость и характеризующая ее высота упругого отскока.

Известно очень много приборов, основанных на этом принципе. На

рис. 18.7, *a* приведена схема молотка Шмидта. Прижимая боек молотка к бетону, взводят ударник, смещая его в крайнее положение. Затем нажатием на спусковую кнопку освобождают защелку, ударник под действием пружин ударяет по бойку, после чего отскакивает вверх, перемещая одновременно указатель измерительного устройства, которое затормаживается в крайнем верхнем положении, регистрируя высоту отскока. Последняя зависит от упругих свойств бетона. Возвратная пружина обеспечивает перемещение после отскока ударника в первоначальное положение, что важно, если приводят испытания бетона на вертикальных или потолочных поверхностях. Молотки выпускают с разной энергией удара, что позволяет использовать их для различных условий испытания. Молотки с энергией удара 0,736 Дж применяют для контроля качества тонкостенных конструкций и бетона с прочностью менее 10 МПа; 2,207 Дж — для обычных конструкций; 29,43 Дж — для массивных сооружений.

Прочность бетона определяют по тарировочным кривым (рис. 18.7, *b*). Кривые учитывают положение молотка при испытании, так как величина отскока будет в известной мере зависеть от его направления, поскольку на нее в определенной мере влияет сила тяжести. Среднюю величину отскока вычисляют по данным пяти измерений, выполненных на определенном участке поверхности бетона. При этом частные значения не должны отличаться от среднего более чем на $\pm 15\%$.

При испытании методами, основанными на механическом воздействии на поверхность бетона, необходимо учитывать тот факт, что при попадании на зерно щебня из плотной прочной породы диаметр отпечатка и высота отскока изменяются, поэтому проводят для каждого участка 5...10 испытаний и результаты, отличающиеся от среднего более чем на 15%, отбрасывают.

При вдавливании штампа глубина отпечатка обычно невелика и в известной мере отражает свойства поверхностного слоя бетона, которые могут значительно отличаться от свойств его внутренних слоев. Влияет на результаты испытания и шероховатость поверхности бетона. С увеличением прочности бетона глубина вмятин и ее изменение в связи с ростом прочности уменьшаются и соответственно понижается точность испытаний. С увеличением диаметра шарика и усилия вдавливания влияние этих факторов несколько уменьшается.

Более полная оценка получается при измерении высоты упругого отскока, так как на его величину влияют не только поверхность, но в определенной мере и внутренние слои бетона. При применении метода выдергивания результаты испытания определяются в основном свойствами внутренних слоев бетона.

На практике наибольшее распространение получили методы вдавливания шарика и упругого отскока, позволяющие измерять прочность бетона с точностью до 15...20%. Точность может быть

повышена при использовании тарировочных кривых, построенных для бетона данного состава и при строго определенных условиях изготовления и испытания изделий и конструкций.

Физические методы контроля качества бетона. К ним относят электронно-акустические методы испытания, которые в свою очередь можно разделить на импульсные и вибрационные. Этими методами определяют скорость и затухание звукового импульса, частоту собственных колебаний и другие подобные характеристики. Так как эти характеристики, как и прочность бетона, зависят от его структуры и свойств составляющих, то по ним можно судить о прочности бетона или изменениях его структуры под действием нагрузки, попеременного замораживания и оттаивания и других факторов. Физические методы позволяют определить прочность бетона и изменение его структуры в разных частях конструкции, в том числе и во внутреннем объеме, недоступном для испытания поверхностными механическими методами.

Наибольшее распространение получил *ультразвуковой импульсный метод* (рис. 18.8,а). По этому методу электронный генератор создает высокочастотные электрические импульсы, которые в специальном излучателе преобразуются в ультразвуковые механические волны. Излучатель плотно прижимается к образцу или изделию, посылая в него ультразвуковые колебания, которые вновь преобразуются в электрические. Через усилитель эти колебания подаются на измерительное устройство, где суммируются с сигналом, посылаемым генератором. Измерительное устройство позволяет определить время прохождения ультразвука через образец t . Скорость распространения ультразвука

$$v = l(t - t_0), \quad (18.6)$$

где t_0 — время прохождения ультразвука при сомкнутых щупах, определяющее задержку сигнала в местах контакта щупов с бетоном; l — база измерения.

Затем по тарировочным зависимостям (рис. 18.8,б) определяют прочность бетона. Чем плотнее бетон, тем выше его прочность и скорость распространения ультразвука. Так как на прочность бетона и скорость ультразвука изменение его состава, например содержания и вида щебня, технология изготовления, влажность бетона и другие факторы оказывают различное влияние, то следует стремиться к использованию тарировочных зависимостей, полученных для данных конкретных условий производства.

Разновидность импульсного метода — *ударный метод*, который заключается в том, что по образцу наносят удар или серию ударов ручным или электрическим молотком, возбуждая звуковые волны. В двух звукоприемниках, установленных на разном расстоянии от места удара, преобразуют звуковой импульс в электрический. С помощью регистрирующего электронного устройства определяют время прохождения сигнала между звукоприемниками и

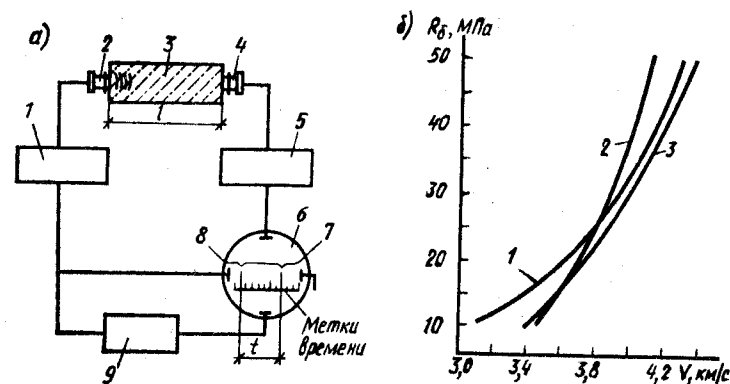


Рис. 18.8. Испытание бетона ультразвуковым методом:
а — схема испытания; 1 — электронный генератор высокочастотных импульсов; 2 — излучатель; 3 — образец; 4 — приемник; 5 — усилитель; 6 — измерительное устройство; 7 — изображение принятого сигнала; 8 — то же, посланного импульса; 9 — блок питания; б — тарировочные зависимости; 1 — бетона на гранитном щебне; 2 — бетон на известковом щебне; 3 — бетон на гравии

затем вычисляют скорость распространения звуковой волны в бетоне. Прочность бетона определяют по соответствующей тарировочной кривой. Ударный метод в отличие от ультразвукового позволяет проводить испытания конструкций большой длины, в частности мостовых и дорожных.

Вибрационные методы основаны на измерении частоты собственных колебаний бетонных образцов или изделий и на определении характеристик их затухания. При этом результаты испытания зависят от качества бетона во всем объеме и являются как бы интегральным показателем качества. На основе подобных испытаний можно судить о появлении в бетоне микродефектов, изменении его структуры и свойств.

В вибрационных методах обычно возбуждают и регистрируют изгибные колебания. В зависимости от вида возбуждения колебаний различают резонансный метод и метод затухания колебаний (рис. 18.9).

При первом методе с помощью электродинамического возбудителя колебаний, чаще всего устанавливаемого в середине пролета, в образце возбуждаются незатухающие колебания, частоту которых можно изменять с помощью генератора звуковой частоты. На некотором расстоянии от возбудителя устанавливают приемник, преобразующий колебания изделий в электрический сигнал, который поступает на индикатор резонанса. При изменении частоты возбуждаемых колебаний наступает момент, когда частота этих колебаний совпадает с частотой собственных колебаний образца или изделия и возникает резонанс, которому соответствует макси-

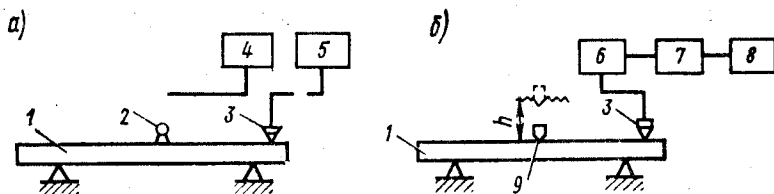


Рис. 18.9. Схемы вибрационных испытаний бетона:

а — резонансным способом; б — затухающими колебаниями; 1 — образец; 2 — возбуждатель колебаний; 3 — приемник колебаний; 4 — измерительный генератор; 5 — индикатор резонанса колебаний; 6 — устройство, формирующее импульсы; 7 — генератор стандартной частоты; 8 — электронный измеритель частоты; 9 — ударник

мальная величина амплитуды колебаний. Этот момент регистрирует индикатор резонанса, а по показаниям измерительного генератора звуковой частоты определяют частоту колебаний, соответствующую максимальной амплитуде A_{\max} . Регистрируемая частота соответствует частоте собственных колебаний образца, которая зависит от состава и свойств бетона и условий испытания.

По частоте собственных колебаний вычисляют динамический модуль упругости E_d , а по тарировочной зависимости определяют прочность бетона: $R_b = f(E_d)$. Для каждого прибора в зависимости от условий испытаний применяют свою методику определения динамического модуля упругости. Прочность бетона связана с этой характеристикой выражением

$$R_b = (E_d/k)^n, \quad (18.7)$$

для обычного бетона ориентировочно принимают $n=3$; $k=52 \cdot 10^2$.

Бетон представляет собой упруговязкопластичный материал, поэтому оценка его качества, в том числе прочности на сжатие по динамическому модулю упругости, который характеризует лишь упругие свойства, не является достаточно полной. Неупругие свойства бетона и его структурные дефекты можно оценивать по логарифмическому декременту затухания колебаний δ , который определяют по ширине резонансного пика и рассчитывают по формуле

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_2 - f_1}{f_0} = 1,8138 \frac{f_2 - f_1}{f_0}, \quad (18.8)$$

где f_0 — собственная частота образца (частота резонанса); f_1, f_2 — частоты колебаний, соответствующие амплитуде, равной $0,5A_{\max}$ до и после резонанса (A_{\max} — амплитуда колебаний при частоте f_0). Для определения значений f_1 и f_2 после установления резонанса опытным путем подбирают частоты, при которых амплитуда составляет половину максимальной.

Определение прочности бетона по двум характеристикам — динамическому модулю упругости и логарифмическому декременту затухания — несколько повышает точность испытания, особенно

если определяется изменение прочности бетона в процессе замораживания и оттаивания, при коррозии и других подобных случаях, когда могут значительно изменяться неупругие характеристики бетона и его микроструктура.

Испытания методом затухания колебаний проводят с помощью ударного приспособления, которым наносят удар по образцу, и специальной аппаратурой регистрируют частоту колебаний. По тарировочным кривым определяют прочность бетона.

К физическим методам относят также радиометрические методы, которые получили распространение главным образом для контроля правильности расположения арматуры в железобетонных конструкциях и определения толщины защитного слоя.

§ 18.3. КОНТРОЛЬ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ БЕТОНА

Внутренние процессы, происходящие в бетоне при твердении, эксплуатации, нагружении, замораживании и самых различных воздействиях, часто находят свое внешнее выражение в виде деформаций всего материала или его отдельных составляющих. По характеру деформаций можно судить о происходящих в бетоне изменениях и о его качестве. Обычно для измерения деформаций применяют традиционные способы: механические или электрические тензометры, компараторы, дилатометры (рис. 18.10).

Весьма прост по устройству *компаратор стрелочного типа*, получивший широкое распространение в практике строительных лабораторий. На специальном штативе между нижним неподвижным упором и верхним подвижным (ножка стрелочного индикатора) устанавливают образец бетона, в торцы которого заделаны реперы, обеспечивающие точность и надежность измерений. В качестве реперов используют стальные или стеклянные шарики диаметром 5 ... 8 мм, стальные или пластмассовые конусы. Стрелочные индикаторы могут также непосредственно закрепляться на образце бетона. Они позволяют производить измерения с точностью до 0,01 ... 0,001 мм. При базе измерений более 10 см это позволяет измерить относительные деформации порядка 10^{-4} ... 10^{-5} , которые характерны для бетона.

Дилатометры применяют для измерения температурных деформаций. Они представляют собой сложные приборы с высококачественной системой измерения и специальными устройствами для нагрева и охлаждения образца; используются главным образом в исследовательских лабораториях.

Большое распространение в последнее время получили *электрические проволоочные тензодатчики*, представляющие собой несколько витков проволоки, наклеенной на бумагу, ткань или пленку. Датчики приклеивают к поверхности материала и присоединяют к приборам, позволяющим регистрировать электрическое сопротивление датчика. При деформации поверхности бетона

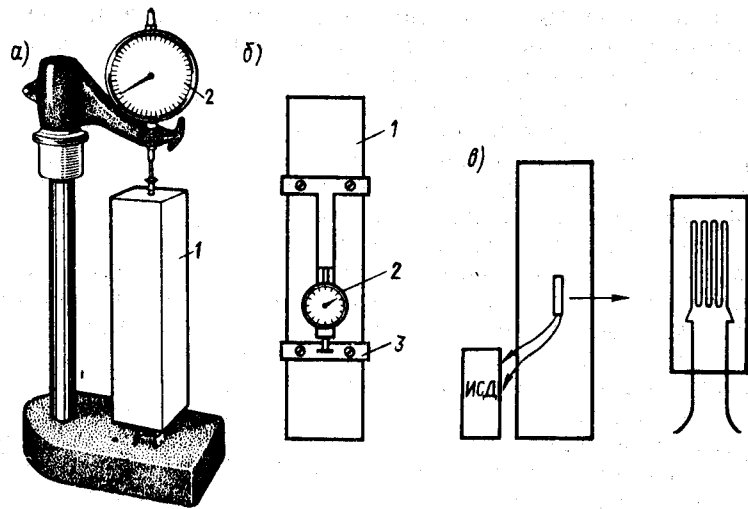


Рис. 18.10. Приборы для измерения деформаций бетона:
 а — компаратор; б — стрелочный индикатор, закрепленный непосредственно на образце; в — электрический тензодатчик сопротивления; 1 — образец; 2 — стрелочный индикатор; 3 — устройство для установки образца

соответствующим образом деформируется тензодатчик (проволока либо растягивается, либо укорачивается) и меняется его омическое сопротивление. По величине изменения сопротивления датчика судят о деформации. Для изготовления датчиков применяют тонкую константановую, мангановую или нихромовую проволоку диаметром 0,02 ... 0,05 мм. База датчиков, на которой проводят измерения, обычно составляет 5, 10, 20 и 50 мм. Для измерения общих средних деформаций бетона используют датчики с большей базой, для измерения местных деформаций — малые датчики.

Относительные деформации ϵ , регистрируемые датчиком,

$$\epsilon = \Delta R / (kR), \quad (18.9)$$

где ΔR — изменение сопротивления датчика при его деформации, Ом; R — начальное сопротивление датчика, $R = 100 \dots 400$ Ом; k — коэффициент чувствительности датчика, для датчиков из константановой проволоки $k \approx 2$.

Изменение величины сопротивления датчика определяют с помощью специальных тензостанций, собранных по электрической схеме моста Уитстона, который обладает высокой чувствительностью к изменению сопротивления плеч. Во избежание ошибок от посторонних факторов используют компенсаторный датчик, наклеиваемый на бетон, не подвергающийся испытанию.

На основе стрелочных индикаторов и электрических тензометров в лабораториях создают приборы, позволяющие измерять

деформации образцов и изделий из бетона и железобетона. По результатам измерений, обычно дополняемым результатами других испытаний (измерением скорости ультразвука, изменением массы и т. д.), ориентировочно судят о качестве бетона или об изменении его структуры и свойств в процессе обработки. Например, чем меньше остаточная деформация бетона после тепловой обработки, тем в меньшей степени происходили в нем деструктивные процессы в ходе прогрева и тем лучше при прочих равных условиях его конечные структура и свойства.

Для контроля трещиностойкости бетона и в ряде других случаев желательно наблюдать все поле деформаций на поверхности образца или конструкции. Большинство известных методов определения деформаций бетона, в том числе механическими и электрическими тензометрами, позволяет измерять деформации в отдельных точках или на небольших отрезках поверхности бетона. Для получения общей картины деформаций приходится применять большое количество датчиков или приборов, возрастает трудоемкость проведения замеров и их камеральной обработки, снижается оперативность получения информации и соответствующего обратного воздействия на процесс с целью нейтрализации подмеченных недостатков.

Кроме того, существует вероятность, что при контроле трещиностойкости трещина может возникнуть на участке, не контролируемом датчиками, и, следовательно, не будет своевременно зарегистрирована. На практике в ряде случаев необходимо также иметь сведения о деформации образца или изделия без непосредственного доступа к его поверхности, например при обработке изделий в закрытых контейнерах. Применяемые для этой цели катетометры или другие специальные приборы позволяют измерять только деформации на отдельных участках изделия, не давая представления об общей картине деформации.

Наблюдать и регистрировать с заданной точностью все поле деформации поверхности бетона без непосредственного контакта с ней позволяют новые способы — муаровый и голографический.

При определении деформаций муаровым методом на поверхность образца наносят или проецируют рабочий растр, представляющий собой частую сетку линий или точек. При деформировании образца меняется положение отдельных элементов рабочего растра и при совмещении его с контрольным растром, не изменяющим своих размеров, возникает муаровая картина, по которой можно вычислить деформации образца (рис. 18.11). Чем больше деформации, тем чаще сетка муаровых полос, интенсивнее их движение.

Широкие возможности по наблюдению и регистрации деформаций бетона открывает голография. Голография — это принципиально новый метод получения изображений предметов, основан

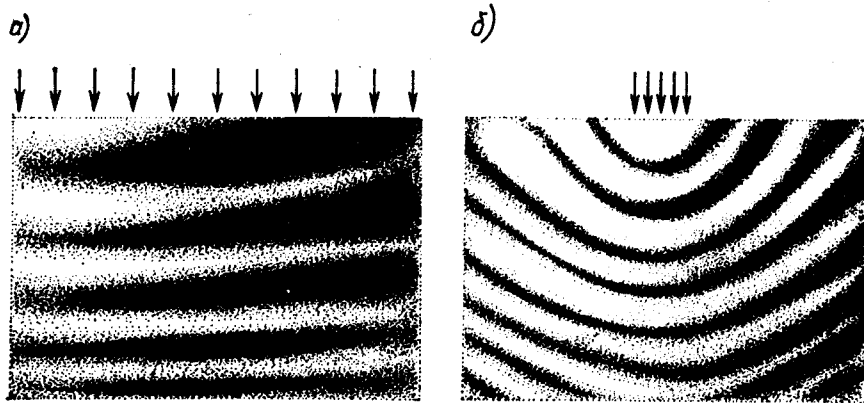


Рис. 18.11. Примеры муаровых картин:

а — при равномерном сжатии; б — при местном сжатии

ный на явлении интерференции света. Для получения голограмм используют свет лазера. В отличие от солнечного света или света электрических ламп, который состоит из спектра световых волн различной длины, лазеры дают монохроматический свет с определенной длиной волны излучения, например газовый гелий-неоновый лазер излучает свет с длиной волны 6328 \AA . Световые волны, излучаемые лазером, могут взаимодействовать, создавая в пространстве сложную интерференционную картину. Для получения голограммы, на которой в закодированной форме записывается изображение предмета, фотопластинка при съемке размещается таким образом, чтобы на нее падали не только лучи света от освещенного лазерным светом предмета (предметный или рабочий пучок), но и свет от лазера (опорный пучок). В этом случае на фотопластинке возникает и фиксируется интерференционная картина взаимодействия двух пучков света. Если после проявления фотопластинку осветить светом лазера, падающим под тем же углом, под которым она освещалась опорным пучком, то за фотопластинкой можно будет увидеть предмет, который возникнет на том же месте, где он располагался при съемке. При этом будет видно его объемное позитивное изображение.

Голограмма обладает рядом интересных свойств. Изображение предмета можно восстановить, используя не всю, а только часть фотопластинки. Если снять с голограммы контактный отпечаток, то полученная копия также восстановит позитивное изображение предмета. На одной голограмме можно записать изображения нескольких предметов (путем наложения интерференционных картин от каждого из них) или записать несколько состояний одного и того же предмета.

Последнее свойство голограмм используется для наблюдения и регистрации деформаций образцов из бетона и других материалов. Если записать на голограмме первоначальное изображение образца, а затем его изображение после деформации, то при восстановлении голограммы световые волны этих изображений проинтерферируют между собой и на изображении предмета возникает вторичная интерференционная картина, например в виде чередующихся темных и светлых полос. Вид вторичной интерференционной картины будет определяться характером деформаций. По этой картине можно судить об изменениях, происшедших с образцом, качественных и количественных, причем с большой точностью можно определять деформации отдельных частей образца и взаимное перемещение отдельных точек предмета. При необходимости эту картину можно сфотографировать и подвергнуть расшифровке.

Достоинством голографического метода исследования деформаций является то, что он позволяет наглядно увидеть и зарегистрировать, во-первых, очень малые деформации, характерные для бетона, во-вторых, наблюдать все поле деформаций и, в-третьих, не требует никакой специальной подготовки образца и позволяет производить наблюдение, регистрацию и измерение деформаций образца без непосредственного контакта с его поверхностью.

Для наблюдения и определения деформаций бетонных образцов используют специальные стенды, на которых можно изучать деформации моделей и образцов из любых материалов.

Одна из возможных оптических схем стенда представлена на рис. 18.12. Луч света от лазера, например ЛГ-36, через фотозатвор попадает на расщепитель, в котором разделяется на два луча. Один из лучей, пройдя точечную диафрагму и объектив, освещает образец, другой освещает непосредственно фотопластинку. Рабочие лучи, отраженные образцом, и опорный пучок лучей взаимодействуют между собой, создавая на фотопластинке сложную интерференционную картину.

Оптическая схема собирается на специальном столе, изолирующем ее от посторонних колебаний. Для регистрации голограмм в схему включается обычный фотоаппарат. Съемка голограмм может произво-

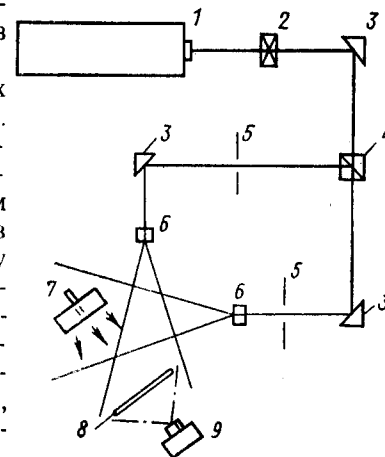


Рис. 18.12. Оптическая схема установки для изучения деформаций бетона голографическим способом:

1 — лазер; 2 — фотозатвор; 3 — зеркало; 4 — расщепитель; 5 — точечная диафрагма; 6 — объектив; 7 — объект; 8 — фотоаппарат; 9 — фотопластинка

даться методом двойной экспозиции или в реальном масштабе времени. В первом случае образец снимается до и после деформации, во втором — до деформации, затем фотопластинка устанавливается на то же место, что и на съемке. При освещении ее светом лазера мнимое изображение совмещается с самим образцом. Теперь изменение светового поля при деформации образца будет интерферировать с остающимся без изменения мнимым изображением и, наблюдая образец через фотопластинку, можно будет увидеть возникающую интерференционную картину, любые ее изменения во времени (как при киносъемке) и по ним судить о происходящих деформациях образца.

Для демонстрации возможностей голографии на рис. 18.13 приведены голограммы. Модуль представляет собой образец размером $7 \times 7 \times 3,5$ см, в центре которого расположена гладкая арматура диаметром 8 мм. Съемка велась с торца (границы 7×7 см). Образец приклеивали к предметному металлическому столику, чтобы предотвратить его перемещение в момент опыта.

На рис. 18.13,а показана картина деформаций при нагрузке гирей массой 10 г, установленной на верхнюю грань образца. Голограмма получена съемкой образцов до и после установки гири. Деформация материала вызвала перемещение отдельных точек образца, отражающих луч лазера, и при съемке на одну пластинку возникла интерференционная картина, показывающая характер деформации. По этой картине с учетом реальной оптической схемы рассчитывается величина деформации бетона. На рис. 18.13,б показаны деформации образца при нагреве стержня арматуры на 2°C . Голограмма получена съемкой образца до нагрева и через 10 с после начала нагрева арматуры. Около стержня видна кольцевая деформация

(расширение материала от стержня к наружным граням образца).

При рассмотрении голограмм, полученных при различной выдержке от начала нагрева, можно увидеть распространение тепловых волн в материале. Более наглядно это видно при наблюдении голограмм объекта в реальном масштабе, т. е. когда снятая голограмма объекта до нагрева после проявления устанавливается на прежнее место, а затем при нагреве образца на голограмме возникает интерференционная картина, отражающая распространение температурных деформаций или тепловых волн. В этом случае в первое время от стержня распространяются кольцевые волны. Достигая затем поверхности образца, волны меняют свою форму, а картина деформации материала усложняется. Новый метод наблюдения тепловых полей позволяет промоделировать многие реальные случаи практики, сегодня еще с трудом поддающиеся расчету, и получить необходимые данные для совершенствования конструктивных форм и способов производства изделий.

На рис. 18.13,в приведена голограмма, на которой показано набухание образца при его увлажнении. На верхнюю поверхность образца был положен кусочек ткани, смоченный водой. Вследствие увлажнения в верхней части образца возникли деформации расширения, которые отразились в голограмме.

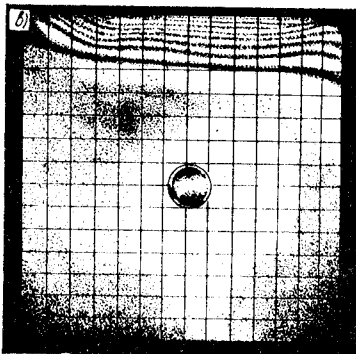
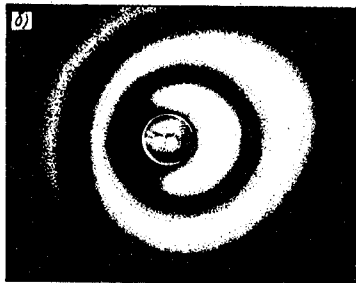
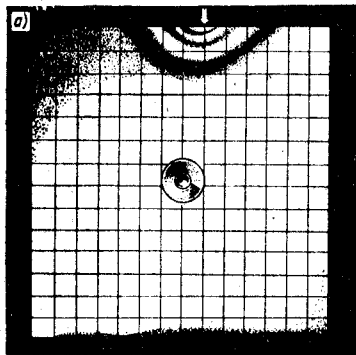


Рис. 18.13. Голограмма образца:

а — при нагрузке 100 Н; б — при нагреве центрального стержня; в — при увлажнении

ГЛАВА 19

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА

§ 19.1. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ БЕТОНА

В современных условиях особенно остро стоит вопрос о повышении качества бетона и об интенсификации его производства. С каждым годом увеличивается разнообразие бетонов, расширяются области применения, предъявляемые к ним требования, сырьевая база производства. В технологии бетона переходят к многокомпонентным рецептурам с добавками-регуляторами, используют новые физико-химические процессы, применяют сложное оборудование с элементами автоматизации, объединяют в единые системы большие производственные коллективы и т. д.

В этих условиях задача управления качеством и производством бетона, изделий и конструкций из железобетона усложняется. Выбор оптимальных решений требует широкого применения математических методов, позволяющих оценивать варианты и сравнивать их между собой.

С помощью математических методов можно исследовать и анализировать определенные сложные системы, включающие много

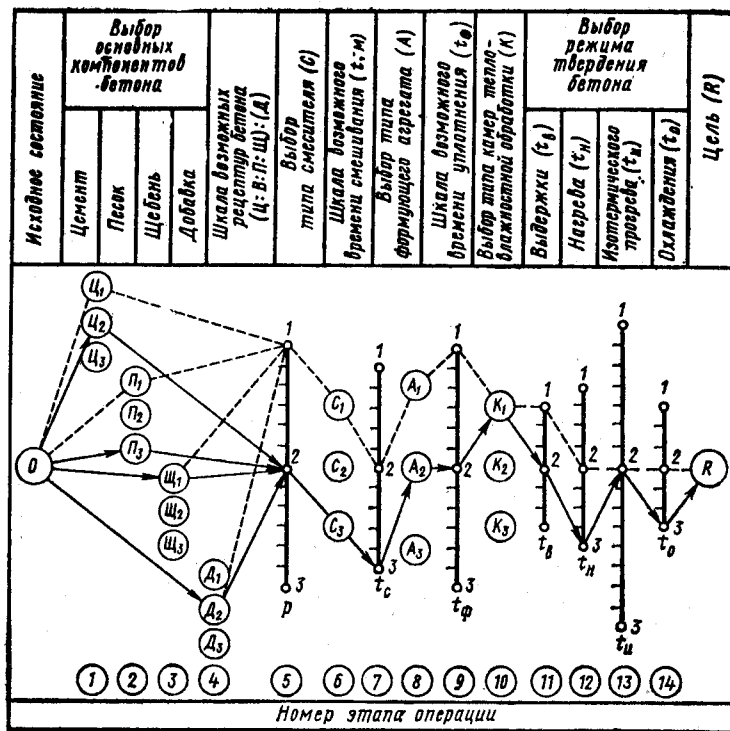


Рис. 19.1. Блок-схема решения задач в технологии бетона

элементов и связей, и на основе подобного анализа отыскивать решения, наилучшим образом удовлетворяющие поставленным целям. В качестве примера такой системы можно рассмотреть блок-схему решения задач в технологии бетона (рис. 19.1). Получение бетона с определенным комплексом свойств будет зависеть от многих технологических факторов, которые можно разделить на пять основных групп. В каждую группу входит несколько технологических факторов, число которых определяется условиями решаемой задачи. Например, факторы группы С, определяющие режим перемешивания, могут включать в простейшем случае время и скорость перемешивания или учитывать энергию перемешивания на единицу массы, температуру смеси, конструктивные особенности смесителя и др.

Общее число технологических факторов, оказывающих влияние на свойства бетона, может быть очень большим. В этом случае успешное управление технологией, подразумевающее влияние наиболее существенных факторов и целенаправленное воздействие на них с целью достижения заданных свойств бетона или решения других задач, без анализа данной системы с помощью ма-

тематических методов практически невозможно, тем более что при исследовании и анализе системы приходится учитывать не только прямое влияние технологических факторов на свойства бетона (на рис. 19.1 — сплошные линии), но и обратное — влияние проектируемых свойств на назначение того или иного технологического параметра (на рис. 19.1 пунктир), а также взаимодействие факторов внутри группы и между отдельными группами.

Для успешного применения математических методов и управления технологией бетона и железобетона большое значение имеют правильная оценка технологических факторов и выбор соответствующих критериев. В ряде случаев это требует совершенствования существующих методов определения свойств материалов и параметров технологических процессов, разработки таких методов испытаний и выбора параметров и характеристик материалов, которые отвечают по точности и достоверности применяемым методам математических исследований и анализу технологических систем.

Системы можно разделить на два класса: детерминированные и стохастические, хотя в практике производства исследуемые системы часто не делятся столь четко.

К детерминированным относят системы, в которых составные части взаимодействуют точно предвидимым образом. При исследовании детерминированной системы не возникает никакой неопределенности. Изменение одного из элементов системы на некоторую величину всегда вызывает изменение другого или других на строго определенную величину. В терминах блок-схемы технологии бетона (рис. 19.1) это соответствует следующему: если величина какого-то технологического фактора x_i изменится на Δx_i , то свойство y_i всегда изменится на Δy_i . Отдельные подсистемы технологии бетона можно отнести к детерминированным, например уменьшение диаметра шариковидных зерен приводит к увеличению их удельной поверхности.

Для стохастической (вероятностной) системы нельзя сделать точного детального предсказания. Такую систему можно тщательно исследовать и установить с большой степенью вероятности, как она будет себя вести в любых заданных условиях. Однако система все-таки остается неопределенной и любое предсказание относительно ее поведения никогда не может выйти из логических рамок вероятностных категорий, с помощью которых это поведение описывается. В стохастических системах изменение одного из элементов не всегда вызывает изменение другого (связанного с ним), а только в некоторых случаях. Если x_i изменился на Δx_i , то R_k изменится на $\Delta R_k + \varphi$, где φ — случайная величина. Если под действием случайности $\varphi = -\Delta R_k$, то влияние x_i на R_k вообще в данном наблюдении обнаружено не будет.

В технологии бетона и железобетона стохастические системы имеют большое распространение. Например, распределение со-

ставляющих и элементов структуры подчиняется вероятностно-статистическим закономерностям, роль случайного эффекта возрастает при увеличении объемов (при переходе от лабораторных образцов к изделиям), а также при переходе от единичной к массовой продукции.

В технологической системе действует большое число взаимосвязанных факторов x_i . Из них только часть можно детерминированно учесть, а остальные факторы всегда создадут случайный эффект, поэтому использование стохастических систем в технологии сборного железобетона позволяет успешно решать многие задачи управления качеством и производством.

Управление — процесс целенаправленный. Формулировка цели решается в каждом отдельном случае на основе технологических и экономических условий. Целью может быть, например, достижение железобетоном оптимального качества и поддержание его на этом уровне с максимальной стабильностью. Средством к достижению цели является управление технологическими факторами x_i , действующими в технологии как в сложной стохастической системе.

Сложность управления технологией бетона иллюстрирует схема принятия решения при проектировании технологии железобетонных конструкций (рис. 19.1). Из исходного состояния O необходимо прийти к цели — получению заданной прочности R , выбирая вид основных компонентов бетона, его рецептуры, тип оборудования и режимы работы.

На рис. 19.1 условно показаны 14 этапов, причем на каждом есть лишь три альтернативы, например песок трех карьеров, три типа бетоносмесителей и т. д. Составы и режимы отображаются непрерывными шкалами, но для простоты на них выбраны лишь три точки, например прогрев бетона в течение 4,6 и 8 ч. Даже при таких жестких ограничениях имеется 3^{14} возможных вариантов, т. е. 4 782 969 решений, отличных хотя бы одним элементом технологии. Если предположить, что на основании предыдущего опыта можно забраковать 99,99% вариантов, то остаются конкурирующими около 500 решений. Необходимо с помощью математических методов оценить, какое из этих решений в наибольшей степени отвечает поставленной цели.

Степень достижения цели характеризует показатель, который называют критерием эффективности или оптимальности. В качестве критерия могут быть выбраны различные показатели: прочность или другие свойства бетона, производительность завода или цеха, себестоимость продукции и др. Выбор критерия определяется назначением рассматриваемой системы. Каждому варианту решения соответствует определенное значение выбранного критерия, и задача оптимального управления состоит в том, чтобы выбрать и реализовать такой вариант, при котором критерий имеет

экстремальное (максимальное или минимальное) значение при данных условиях производства.

Для определения критерия эффективности используют функцию $I=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_i — все факторы, существенным образом влияющие на исследуемый процесс. Эту функцию обычно называют целевой, а в математической теории эксперимента — функцией отклика.

Задается лишь один критерий эффективности, ибо при определенном варианте решения (управления) можно добиться экстремума лишь одного критерия и невозможно, чтобы два произвольно заданных критерия достигали экстремума одновременно, если нет случайного совпадения (рис. 19.2). В некоторых случаях могут приниматься компромиссные решения, расположенные в зоне Δx , когда за счет некоторого снижения критерия I_1 достигается рост I_2 .

Изложенное объясняет, почему неверны требования такого типа: «достигнуть максимальной прочности бетона при минимальном расходе цемента». Корректной является постановка задачи в такой формулировке: «достигнуть максимальной прочности бетона при условии, если расход цемента C не превысит $C_{кр}$, а технологический параметр S не выйдет за пределы $S_{кр}$ ». В такой формулировке указан не только критерий эффективности, но и пределы, в которых могут изменяться управляемые факторы, т. е. даны их ограничения.

Во всех реальных ситуациях на технологические факторы наложены определенные ограничения, т. е. $(x_i)_{min} \leq x_i \leq (x_i)_{max}$. Например, подвижность бетонной смеси должна быть в пределах, обеспечивающих ее плотную укладку без расслоения, температура тепловлажностной обработки бетона при атмосферном давлении не должна быть более 100°C и т. д. Кроме того, обычно имеют место ограничения материальных ресурсов (количество и качество сырья, типы оборудования, финансовые и трудовые возможности и т. д.) и времени для достижения цели.

■ Наличие ограничений позволяет сформулировать два типа задач оптимизации: 1) достижение заданного уровня критерия эффективности при минимальном расходе ресурсов; 2) достижение максимального уровня критерия эффективности при полном расходе выделенных для достижения цели ресурсов.

Типичным примером задач первого типа является подбор состава заданной марки бетона при минимальном расходе цемента. Типичная задача второго типа — достижение заводом максимального выпуска бетона при определенных запасах цемента.

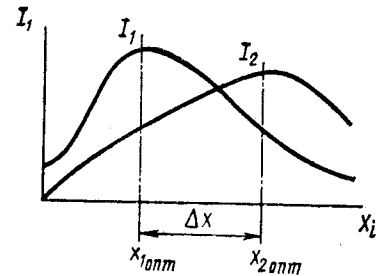


Рис. 19.2. Критерии эффективности и зона оптимальных решений

■ К критериям эффективности, предназначенным для технологических решений, предъявляется ряд требований: 1) критерий должен характеризовать эффективность технологии с учетом конечной цели производства, а не отдельных его этапов, однако в сложных системах при использовании ступенчатой оптимизации допускается применение разных критериев на каждом этапе; 2) критерий должен быть количественным и однозначным, причем желательно, чтобы он имел физический смысл и легко вычислялся (если у критерия нет числовой оценки, то, как исключение, допустимо применение рангов 1, 2, ..., n по некоторым формализованным шкалам); 3) критерий должен обладать статистической эффективностью, которая характеризуется нечувствительностью критерия к малым случайным воздействиям и минимальной (в пределах метрологической точности) ошибкой воспроизводимости для параллельных опытов в одной серии; 4) критерий по возможности должен обладать универсальностью, т. е. учитывать и экономическую, и техническую стороны технологии (в этом смысле относительная прочность бетона на единицу расхода цемента — более универсальный критерий, чем абсолютная прочность бетона). Правильный выбор критерия эффективности — необходимое условие успешного принятия оптимального решения.

§ 19.2. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

● *Управление системой предполагает принятие обоснованных решений о том или ином выборе или изменении входных параметров (технологических факторов применительно к производству сборного железобетона).* Выбор правильного решения из большого числа вариантов значительно облегчается при формализации процесса принятия решения и применении количественного описания альтернатив. При этом быстрый анализ системы в необходимом случае обеспечивает использование ЭВМ, в программу которой заложена математическая модель поведения системы.

Модель — особая форма абстрагирования, т. е. отвлечения тех или иных элементов и связей от множества реально существующих в системе. Вне зависимости от привлекаемых к решению задачи методов анализа (физики, химии, кибернетики и т. д.) возникает необходимость построения некоторых абстракций. В зависимости от того, какие стороны объекта представлены в модели, различают модели: 1) субстанционные; 2) структурные; 3) функциональные.

Материал субстанционных моделей (вещество, субстанция) по некоторым свойствам совпадает с материалом оригинала. Например, контрольный образец — куб бетона, изготовленный параллельно с конструкцией, — является субстанционной моделью ее

материала, так как бетон в образце по своим основным свойствам совпадает с бетоном конструкции.

Под структурной моделью понимают модель, имитирующую внутреннюю структуру оригинала (способ организации элементов объекта). При этом может моделироваться как структура процесса, например технологическая система производства бетона, так и статистическая структура, например способы укладки зерен заполнителя различных фракций в массе бетона.

Функциональные модели имитируют способ поведения (функцию) оригинала. Функциональный подход, роль которого в современной науке резко возросла, характеризуется как бы двойной абстракцией — абстрагированием сначала от вещественного субстрата системы с вычислением ее внутренней структуры и последующим абстрагированием от последней с выделением функциональных связей системы со средой. Обобщенным абстрактным образом функциональной модели является метод «черного ящика», получивший в кибернетике широкое распространение и теоретическую разработку. Понятие «черный ящик» описывает такую систему, внутренняя структура которой неизвестна и недоступна для наблюдения, а известны лишь параметры «входа» x_i (факторы) и «выхода» y (критерий эффективности I , отклик и т. д.). В этом случае задача управления сводится к подбору таких уровней x , которые обеспечили бы определенные значения y , в частности оптимальные. Исследуя значения x и соответствующие им значения y , можно найти статистическую закономерность, описывающую эту связь.

Такой подход к задачам технологии бетона и железобетона позволяет абстрагироваться от некоторых сложных и пока мало изученных физико-химических явлений, происходящих в бетоне в процессе их получения и эксплуатации. Однако это не отрицает необходимости дальнейших исследований причин и явлений в структуре системы, так как чем полнее наши представления о процессе или явлении, тем точнее и достовернее математические модели, их отражающие. Метод «черного ящика», основанный на использовании эмпирических способов при системном кибернетическом подходе, позволяет найти и использовать в управлении технологией статистические закономерности.

В результате количественного исследования функциональной модели «черного ящика» удается получить совокупность соотношений, которые выражают в виде математических зависимостей (графиков, уравнений, неравенств, логических условий, графов и т. д.) реальные физические характеристики систем. Эта совокупность соотношений вместе с условиями, ограничивающими пределы изменения физических характеристик, позволяет построить математическую модель. Другими словами, *математической моделью называется описание системы на формальном языке, позволяющее выводить суждение о некоторых чертах поведения*

этой системы с помощью формальных процедур над ее описанием.

В зависимости от использованных систем получают модели, обобщающие с известной точностью определенный процесс или явления, как, например, обобщенные модели прочности бетона (типа формулы Болломея с усредненными коэффициентами, полученными по результатам испытаний бетона на разных материалах) либо частные модели, описывающие данный процесс или явление в конкретных условиях, например модель прочности бетона (график или формула) для определенных видов материалов, используемых на данном объекте строительства.

Наибольшую сложность при построении любой математической модели представляет решение вопроса о выборе формы связи между переменными. Однако ряд трудностей моделирования можно исключить, если принять ограничение: модель должна как можно точнее описывать поведение системы в конкретной ситуации. Тогда можно исходить из принципа максимальной начальной простоты модели поведения, а не искать в каждой задаче специальных математических форм связи между факторами x_i (число факторов k) и откликом y . Если самая простая модель окажется недостаточно точной, то ее можно усложнить. Воспользовавшись тем, что любую непрерывную функцию можно разложить в ряд Тейлора, который преобразуется в степенной ряд, начальную модель поведения системы удобно представить в виде полинома m -й степени (на практике достаточно $m \leq 3$):

$$y = \beta_0 = \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots \quad (19.1)$$

При расчете по результатам исследования системы необходимо как можно точнее найти оценки $b_i \rightarrow \beta_i$ и т. п. в такой локально-интегральной модели. Это позволяет для истинного значения y_n получить по модели (19.1) расчетную величину

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (19.2)$$

Коэффициенты b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} модели (19.2) определяют методом наименьших квадратов.

Для определения зависимости y необходимо иметь хотя бы два различных значения x . При k -факторной полиномиальной модели требуется не менее $(k+2)(k+1)/2$ различных наблюдений. Использование локально-интегрального (полиномиального) моделирования — это один из частных, хотя и очень распространенных, методов построения модели технологической ситуации.

■ В технологии сборного железобетона можно использовать различные математические методы, которые условно можно разде-

лить на три группы: *группа А* — вероятностно-статистические методы, включающие использование общей теории вероятности, описательной статистики, выборочного метода и проверку статистических гипотез, дисперсного и регрессионного анализа, математической теории экспериментов и др.; *группа В* — методы исследования операций, включающие линейное, нелинейное и динамическое программирование: теорию игр, теорию массового обслуживания, теорию графов и сетей и т. д.; *группа В* — методы математического анализа, включающие дифференциальное, интегральное и векторное исчисление, дифференциальные уравнения, в том числе уравнения математической физики, используемые для составления и расчета математических моделей на основе определенных предпосылок о физико-химии исследуемых процессов.

Такое выделение групп условно, поскольку построенные статистическими методами математические модели могут изучаться в дальнейшем с помощью, например, линейного программирования.

Математическое моделирование должно проводиться только на основе информации о конкретной технологической ситуации. Для детерминированных моделей необходимо, как правило, представление об их физико-химической природе и зависимостях, управляющих наблюдаемым процессом. При построении статистических моделей можно ограничиться сведениями о том, как изменение технологических факторов x влияет на конечное качество y . Эти сведения можно получить только наблюдением за выбранной системой, причем понятие «наблюдение» здесь следует трактовать широко — как собственно наблюдение и как эксперимент.

При собственном наблюдении исследователь лишь пассивный свидетель происходящих явлений, а сам процесс наблюдений никак не влияет на развитие этих явлений. Модель, построенная на основе такого наблюдения, будет справедлива только для наблюдавшегося диапазона изменения факторов, а условия оптимальности могут иметь частный характер и могут не совпадать с положением главного оптимума.

Более высокую ступень познания системы обеспечивает эксперимент, при котором исследуемые процессы воссоздаются в необходимых условиях. Эксперимент позволяет построить более совершенные модели, чем модели, полученные в результате только наблюдения. Рассмотрим модель, которую часто используют для решения технологических задач. Для простоты изложения примем лишь три параметра входа — x_1, x_2, x_3 и один параметр выхода — y , хотя все далее сказанное об этой модели легко обобщается на k -мерную модель. Система является стохастической, поскольку на нее кроме контролируемых и регулируемых факторов x действуют случайные факторы, для которых заранее не известны ни количественные, ни качественные оценки.

Для изучения этой технологической системы могут быть вы-

Таблица 19.1. Таблица результатов измерений в трехфакторной ситуации (выделенное поле—план эксперимента)

Номер опыта	Значение факторов			Число параллельных измерений	Выход
	x_1	x_2	x_3		
1	x_{11}	x_{21}	x_{31}	m_1	y_1
2	x_{12}	x_{22}	x_{32}	m_2	y_2
...
u	x_{1u}	x_{2u}	x_{3u}	m_u	y_u
...
N	x_{1N}	x_{2N}	x_{3N}	m_N	y_N

браны два пути сбора информации: наблюдение и эксперимент. Информация о поведении системы представляется в виде табл. 19.1. Наблюдение обычно ведется в производственных условиях, когда нельзя менять в любых пределах значение x из-за риска расстроить нормальный технологический процесс и допустить брак в продукции. Через определенные промежутки времени (реже непрерывно) фиксируют значение входа x_i и выхода y . При наблюдении за системой уровни входных факторов x_i оказываются расположенными бессистемно, хаотически, так как наблюдатель не регулирует их по своему усмотрению.

При проведении предварительных экспериментов варьируемые факторы изменяются сознательно по специальному плану и фиксируются значения выхода, соответствующие той или иной заранее намеченной комбинации x . В табл. 19.1 выделено поле, которое ограничивает число опытов N , уровни факторов x_i , число параллельных измерений m . Это поле называют «планом эксперимента», действительно, при проведении предварительных опытов всегда намечают проведение того или иного числа опытов с определенным количеством повторений, а также выбирают уровни изменений факторов. Составление плана целесообразно проводить на основе математической теории эксперимента, которая изучает оптимальное управление экспериментом при неполном знании механизма явления.

§ 19.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА БЕТОНА ПО МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ

Способы определения состава бетона, рассмотренные в гл. 10, основаны на средних зависимостях. На производстве после проведения соответствующих опытов эти зависимости уточняют и тем самым повышают точность расчета состава бетона. Однако в рассмотренных способах во избежание сложных математических расчетов и вследствие недостаточной информации по взаимному влиянию многих факторов на свойства бетона число учитываемых

факторов ограничено, что в известной мере препятствует дальнейшему повышению точности расчета.

Применение математических моделей, которые получают в результате предварительных опытов и в которых можно учитывать большое количество факторов, действующих в конкретных условиях производства, позволяет не только уточнить технологические расчеты, но и успешно управлять качеством бетона и производством железобетонных изделий, внося необходимые коррективы в процесс при любом изменении входных параметров. Математические модели получают в результате правильно спланированного эксперимента и применяют в тех конкретных условиях, для которых они получены. Для других условий требуется проверять применимость той или иной модели и вносить соответствующие коррективы.

В моделях наряду с оценкой свойств по стандартным методикам могут использоваться и другие критерии, в наибольшей мере соответствующие физике явлений и способствующие повышению точности расчетов.

Процесс получения многофакторных математических моделей включает следующие этапы: расчет основного исходного состава бетонной смеси, выбор факторов и интервалов их варьирования, выбор плана и условий проведения экспериментов, расчет всех составов бетонной смеси и проведение экспериментов по выбранному плану, обработка результатов экспериментов с получением математических зависимостей свойств бетона и бетонной смеси от выбранных факторов.

Основной исходный состав бетона назначается в соответствии с указаниями гл. 10. В обязательном порядке основной состав бетона проверен и откорректирован опытами.

В качестве факторов (варьируемых в экспериментах величин) в зависимости от условий задачи могут приниматься расходы цемента, крупного и мелкого заполнителей, показатели качества крупного и мелкого заполнителей, соотношения между объемами отдельных фракций крупного или мелкого заполнителей, расходы различного вида добавок и т. п. При подборе составов бетонов одновременно нескольких марок за основной уровень факторов принимают их значения для средней марки бетона. Значение факторов в основном исходном составе бетона называется основным уровнем. При проведении опытов все факторы варьируют только на двух уровнях: верхнем и нижнем, — отстоящих от основного уровня в большую и меньшую сторону на одинаковую величину, называемую интервалом варьирования. Интервал варьирования устанавливают в зависимости от пределов рационального колебания факторов.

Для упрощения записей и последующих расчетов верхний уровень факторов обозначается символом $(+1)$, а нижний уровень — символом (-1) . Такая запись равносильна переводу факторов

в новый кодовый масштаб по формуле

$$x_i = (X_i - X_{i0}) / \Delta X_i, \quad (19.3)$$

где x_i — значение i -го фактора в новом, кодовом масштабе; X_i — значение i -го фактора в старом натуральном масштабе; X_{i0} — основной уровень i -го фактора; ΔX_i — интервал варьирования i -го фактора.

Эксперименты в зависимости от количества факторов выполняются по *специальному плану*. Примеры плана для трехфакторного и четырехфакторного эксперимента приведены в табл. 19.2 и

Таблица 19.2. План проведения экспериментов при числе факторов, равном 3

№ опыта	Матрица планирования						Свойства бетона y_i
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	
2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	
4	+1	-1	+1	-1	+1	-1	
5	-1	+1	-1	-1	+1	-1	
6	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
7	-1	-1	-1	+1	+1	+1	
8	+1	-1	-1	-1	-1	+1	

Таблица 19.3. План проведения экспериментов при числе факторов, равном 4

№ опыта	Матрица планирования										Свойства бетона y_i
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	
2	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	
4	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	
5	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	
6	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	
7	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	
8	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	
9	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
10	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
11	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	
12	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	
13	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	
14	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	
15	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	
16	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	

19.3. Аналогичным образом составляют таблицы и при другом числе факторов. В графе 1 табл. 19.2 задается порядок выполнения опытов. В графах 2...4 помещены значения соответственно первого (x_1), второго (x_2) и третьего (x_3) факторов. Эти графы задают условия проведения опытов. Так, согласно плану, в первом опыте факторы $x_1 = -1$ и $x_2 = -1$ должны устанавливаться на нижнем уровне, а фактор $x_3 = +1$ — на верхнем. Значения 5...7 (x_1x_2 , x_1x_3 , x_2x_3) получены путем перемножения элементов граф 2...4. Если значения граф 2...4 применяются для определения состава бетона и условий опытов, то значения граф 5...7 используются для обработки их результатов. В последующих графах таблицы помещают результаты определений свойств бетона.

После проведения опытов в последовательности, указанной планом (графа 1 табл. 19.2 и 19.3), их повторяют в обратной последовательности, получая, таким образом, по два наблюдения (результата) в каждом опыте. Объем замеса в каждом опыте устанавливают с учетом числа определяемых характеристик бетона (прочностей при сжатии, растяжении, изгибе и т. д.). Приготовление бетонной смеси, формование образцов, испытание бетонной смеси и затвердевшего бетона, вычисление фактических расходов материалов выполняют в обычном порядке в соответствии с указаниями гл. 10.

Результаты опытов обрабатывают *методами математической статистики*, получая при этом в алгебраической форме уравнения, выражающие зависимости исследуемых свойств бетона от исходных факторов:

1) для трехфакторного эксперимента

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3; \quad (19.4)$$

2) для четырехфакторного эксперимента

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (19.5)$$

где $i, j = 1, 2, \dots$ — порядковые номера факторов; y — исследуемое свойство бетона; x_i — исходные факторы; b_i и b_{ij} — коэффициенты, которые вычисляются по следующим формулам:

$$b_0 = \sum_{u=1}^N \bar{y}_u / N; \quad (19.6)$$

$$b_i = \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u / N; \quad (19.7)$$

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u / N, \quad (19.8)$$

Таблица 19.4. Значения F-критерия для 5%-ного уровня значимости

f_2	F-критерий при f_1			f_2	F-критерий при f_1		
	4	8	16		4	8	16
1	7,71	5,32	4,49	8	6,04	3,44	2,59
2	6,94	4,46	3,63	9	6,00	3,39	2,54
3	6,59	4,07	3,24	10	5,96	3,35	2,49
4	6,39	3,84	3,01	11	5,91	3,28	2,42
5	6,26	3,69	2,85	15	5,86	3,22	2,35
6	6,16	3,58	2,74	20	5,80	3,15	2,28
7	6,09	3,50	2,66				

где \bar{y}_u — среднее значение исследуемого свойства бетона в u -м опыте; x_{iu} — значение фактора x_i в u -м опыте; x_{ju} — значение фактора x_j в u -м опыте ($j \neq i$); N — количество опытов по плану (для трехфакторного эксперимента $N=8$, для четырехфакторного эксперимента $N=16$).

После получения уравнений производят проверку отличия коэффициентов b_i от нуля и пригодности уравнений для описания исследуемых зависимостей.

Данные проверки выполняют по критериям Стьюдента и Фишера. В каждом опыте вычисляют абсолютное значение разности между двумя параллельными наблюдениями по формуле

$$l_u = |y_{1u} - y_{2u}|; \quad (19.9)$$

определяют среднеквадратическое отклонение, характеризующее ошибку опыта, по формуле

$$s_1 = \sum_{u=1}^N l_u / (1,585N); \quad (19.10)$$

вычисляют доверительный интервал для коэффициентов уравнений по формуле

$$\Delta b_i = t s_1 / \sqrt{N}, \quad (19.11)$$

где t — значение критерия Стьюдента, принимаемое по табл. 19.4 в зависимости от числа степеней свободы f_1 , при которых определялось s_1 .

При двукратном повторении каждого опыта число степеней свободы равно числу опытов N , т. е. $f_1 = N$. Значения критерия Стьюдента t для 5%-ного уровня значимости:

Число степеней свободы	4	8	10	12	14	16	20	25	30
Критерий Стьюдента	2,78	2,31	2,23	2,18	2,15	2,12	2,09	2,06	2,04

Абсолютные значения коэффициентов уравнения сравнивают с доверительным интервалом, вычисленным по формуле (19.11). Если абсолютное значение коэффициента превышает доверительный интервал, то его признают значимым, в противном случае коэффициент и соответствующий ему член уравнения отбрасывают. Полученное после этой процедуры уточненное уравнение содержит только члены со значимыми коэффициентами. Для проверки пригодности полученного уточненного уравнения вычисляют дисперсию по формуле

$$s_2^2 = \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{y}_u)^2 / (N - k), \quad (19.12)$$

где \bar{y}_u — среднее значение исследуемого свойства бетона в u -м опыте; y_u — значение исследуемого свойства бетона в u -м опыте, вычисленное по уточненному уравнению; k — количество коэффициентов, включая b_0 , в уравнении после отбрасывания незначимых коэффициентов (приравненных к нулю).

Эмпирическое значение F_3 -критерия

$$F_3 = s_2^2 / s_1^2 \quad (19.13)$$

сравнивают с табличным значением F -критерия (табл. 19.4) для степеней свободы, с которым определялись s_2^2 и s_1^2 . Число степеней свободы, соответствующее s_2^2 ,

$$f_2 = N - k. \quad (19.14)$$

Уравнение признается пригодным, если $F_3 < F$. Прежде чем использовать полученное уравнение для решения поставленных задач, необходимо проверить его в производственных условиях.

Планирование экспериментов может проводиться и по другим планам, примеры которых приводятся в специальной литературе.

Повышения точности определения состава бетона можно достигать при применении структурно-технологических характеристик заполнителя, учете активности и нормальной плотности цемента и при применении обычных способов подбора состава бетона (см. гл. 10, 11). Получаемые в этом случае результаты почти не требуют корректировки и могут быть использованы в технико-экономических расчетах.

При проведении таких расчетов удобно ввести понятие об эталонных материалах, свойства которых строго определены. Примем за эталонные материалы цемент М400 с нормальной плотностью 25%, песок с водопотребностью 7%, щебень с водопотребностью 3% и значением коэффициента $A=0,6$. Эти характеристики соответствуют свойствам обычно применяемых материалов, в частности песку средней крупности и щебню с предельной крупностью 40 мм.

Таблица 19.5. Расход воды в бетоне на эталонных материалах, л

Подвижность бетонной смеси, см			Жесткость бетонной смеси, с	
8...10	3...5	1,2	5...8	15...25
195	180	165	150	135

Для расчета бетона на эталонных материалах можно использовать обычный способ, рассмотренный в гл. 10. Такой состав бетона можно условно принять за эталон.

Ориентировочный расход воды для получения бетонной смеси различной подвижности на эталонных материалах дан в табл. 19.5.

При применении других материалов расход воды корректируют с учетом их водопотребности:

$$V_{др} = V_{эт} + \Delta B; \quad (19.15)$$

$$\Delta B = (HГ - 25)Ц + (B_n - 7)П + (B_{щ} - 3)Щ. \quad (19.16)$$

При расчете ΔB можно принять средние показатели: расход песка в бетоне — 600 кг/м³, расход щебня — 1200, расход цемента 300 кг/м³. Расход других материалов корректируют обычным порядком. Как правило, достаточно одной корректировки, но при необходимости корректируют до тех пор, пока разница в расходах материалов не будет меньше точности дозирования. Подобные расчеты легко выполняются с помощью ЭВМ. Подобная методика позволяет довольно просто сравнивать бетоны, приготовленные на различных материалах.

ГЛАВА 20

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕТОНА

§ 20.1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА

В современных условиях особое значение приобретают дальнейшее повышение эффективности и качества бетона, совершенствование его технологии, резкое увеличение производительности труда в производстве сборного и монолитного железобетона. В заключительной главе целесообразно рассмотреть некоторые новые возможности в решении этих задач, еще мало используемые в практике строительства.

Для повышения эффективности бетона существенное значение имеет более полное использование всех возможностей цемента, создание оптимальной структуры цементного камня в бетоне. Повышение тонкости помола цемента с 3000 до 5000 см²/г увеличи-

вает активность цемента на 10...20% и ускоряет твердение бетона (в 1,5...2,5 раза в возрасте 1 сут). Однако при этом резко возрастает время помола, на 30...40% снижается производительность помольного оборудования и на 25...30% возрастают затраты электроэнергии. Кроме того, тонкомолотый цемент быстро теряет свою активность, его необходимо сразу же употреблять в дело.

Эффективность дополнительного помола можно повысить, если проводить помол совместно с химическими добавками, способствующими размалыванию клинкера, и с добавками поверхностно-активных веществ, в том числе пластификаторов и суперпластификаторов. При этом одновременно повышается эффективность используемых пластификаторов, что позволяет снизить их дозировку. Целесообразно проводить дополнительный помол только части цемента (20...30%), что уменьшает затраты на эту операцию. При этом при твердении цемента создается более плотная и долговечная структура цементного камня, так как в цементе будут присутствовать зерна разных размеров и его плотность будет выше, чем при применении тонкомолотого цемента, содержащего зерна приблизительно одинакового размера.

Повышения эффективности использования цемента в бетонах малой и средней прочности можно достигнуть, применяя *тонкомолотые добавки*. Совместный помол цемента или цементного клинкера с золой, шлаком и другими материалами позволяет получить эффективные смешанные вяжущие. При этом целесообразно использовать хорошо размалываемые и гидравлически активные материалы. В этом случае в твердеющем цементе будут содержаться зерна разных размеров, между наполнителем и зернами цемента будут возникать химические связи и все это будет способствовать получению плотного и прочного цементного камня при сокращенном расходе цементного клинкера.

С целью приближения помола цемента к местам его непосредственного пользования дополнительный помол целесообразно проводить на региональных помольных установках, а в некоторых случаях дополнительный помол части цемента с суперпластификаторами или комплексными добавками на их основе целесообразно организовывать непосредственно на заводах сборного или товарного бетона.

В табл. 20.1 показаны возможности повышения качества бетона при использовании дополнительного помола совместно с добавками суперпластификаторов. Этот прием позволяет резко ускорить возведение монолитных сооружений и в ряде случаев на заводах сборного железобетона резко сократить или даже исключить тепловую обработку изделий.

Наряду с дополнительным помолом или вместо него может быть использована *активация цемента* в специальных устройствах или непосредственно в бетоносмесителях. Для предварительной

Таблица 20.1. Влияние дополнительного помола цемента с суперпластификаторами на прочность бетона

Особенности технологии	Прочность бетона при сжатии, МПа, в возрасте			
	12 ч	1 сут	7 сут	28 сут
Контрольный бетон на цементе М400 (Ц=280 кг/м ³ , ОК=1 см), пропаривание по режиму 3+2+6 ч)	120	160	190	230
То же, с суперпластификатором	210	290	370	420
То же, на цементе предварительно домолотом с суперпластификатором	310	420	610	630

активации цемента положительно зарекомендовали себя роторно-пульсационные аппараты (РПА), в которых цементная пульпа под давлением пропускается через специальное устройство, представляющее собой неподвижный и вращающийся диски с отверстиями. При вращении между дисками то возникают, то захлопываются отверстия и в пульпе создается сложное волновое движение, вызывающее измельчение цементных зерен. Обработку цемента проводят в присутствии ПАВ, что повышает ее эффективность. На рис. 20.1 показана зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения при обработке цемента в РПА. Так как в цементной пульпе содержится воды больше, чем в бетоне, то при применении РПА обработке подвергается только часть цемента,

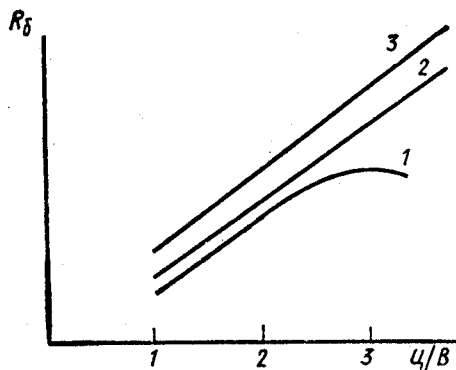


Рис. 20.1. Зависимость прочности бетона от цементно-водного отношения:

1 — обычная технология; 2 — при применении эффективных пластификаторов и суперпластификаторов или особых приемов приготовления и уплотнения бетонной смеси; 3 — при совместном применении эффективных пластификаторов и суперпластификаторов, активации цементного теста с добавками и интенсивного перемешивания и уплотнения

а бетонная смесь затворяется вместо воды предварительно приготовленной цементной суспензией с суперпластификаторами и другими добавками.

Для повышения производительности труда на заводах сборного железобетона и при возведении монолитных конструкций целесообразно использовать *литые бетонные смеси*, особенно в сочетании с *активацией цемента, тонкомолотыми добавками, комплексными химическими добавками на основе суперпластификаторов*. Применение литых смесей сокращает металлоемкость оборудования, повышает качество изделий, способствует

созданию лучших условий труда на заводе и строительной площадке.

Повышение эффективности бетона может быть достигнуто также за счет применения *новых более эффективных вяжущих веществ и новых видов бетона*. Для предварительно напряженных железобетонных конструкций необходимо расширение производства изделий и конструкций на напрягающем цементе, производства проволочного бетона на этом цементе. Для производства сборных железобетонных конструкций необходимо совершенствовать технологию, с тем чтобы можно было использовать особо-быстротвердеющие цементы с ограниченными сроками схватывания. Это позволит отказаться от тепловой обработки сборного железобетона.

§ 20.2. ЭКОНОМИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТРУДОВЫХ ЗАТРАТ В ТЕХНОЛОГИИ БЕТОНА

Постоянная и эффективная экономия материальных, энергетических и трудовых затрат в производстве бетона и железобетонных конструкций и изделий является важнейшей народнохозяйственной задачей. На ее решение направлены правильный выбор материалов для бетона, определение оптимального состава бетона, рациональная организация его производства. Заданные свойства бетона должны обеспечиваться при минимальном расходе материальных, энергетических и трудовых ресурсов.

Наиболее дорогим и энергоемким компонентом бетона является цемент. Расход условного топлива на производство портландцемента М400 составляет около 280 кг/т, М600 — 345 кг/т, в то время как на производство природных заполнителей расходуется 3...6 кг/м³ и искусственных легких заполнителей 90...130 кг/м³ условного топлива, поэтому экономия цемента — важнейшая задача технологии бетона. Применяя различные способы экономии цемента, можно сократить расход цемента на 10...25% по сравнению со средними статистическими данными для рядовой технологии.

Наиболее реальные способы экономии цемента следующие: правильный выбор цемента в зависимости от прочности бетона и условий эксплуатации; введение в бетон суперпластификаторов, пластифицирующих, воздухововлекающих и комплексных добавок, уменьшающих водопотребность бетонной смеси (особенно эффективно применение добавок в производстве высокопрочных и морозостойких бетонов); применение бетонных смесей с минимально допустимой по условиям формирования изделий и конструкций подвижностью (для производства сборного железобетона, как правило, жестких и малоподвижных смесей); применение чистых заполнителей оптимального зернового состава и максимальной крупности, допустимой из условий бетонирования конструкций;

выбор оптимального соотношения между песком и щебнем с учетом их свойств, расхода цемента, условий формирования и последующей эксплуатации изделий; использование способов активации цемента и бетонной смеси; применение микронаполнителей, в том числе золы, молотого шлака и другого вторичного сырья промышленности для бетонов невысокой прочности; использование способов удаления излишней воды из бетона в процессе формирования изделий (гидропрессование, вакуумирование и др.); рациональный выбор режимов твердения бетонов с учетом свойств используемого сырья и условий производства, в частности окончание тепловой обработки при достижении бетоном 50...60% проектной прочности и использование последующего роста прочности, который в этом случае проходит более интенсивно, чем после длительного прогрева; повышение однородности бетона и вследствие этого уменьшение требований к средней прочности бетона; назначение требований к прочности и другим свойствам бетона с учетом реальных сроков строительства и роста прочности во времени, в частности установление заданной прочности бетона по его прочности в возрасте 90 и 180 сут; своевременная корректировка состава бетона и режимов технологических операций при изменении условий производства с целью обеспечения минимального расхода цемента в любых условиях.

В табл. 20.2 приведены данные по относительно изменению расхода цемента разных марок в бетоне без добавок и с суперпластификаторами. За единичный показатель принят расход цемента 315 кг/м³ в бетоне прочностью 30 МПа на цементе М400, необходимый для получения подвижной бетонной смеси (осадка конуса 1...3 см; предельная крупность щебня 20 мм). Повышение марки цемента, жесткости смеси или введение суперпластификаторов позволяет значительно уменьшить расход цемента. При этом необходимо учитывать, что возможное снижение расхода цемента ограничивается требованием получения плотного бетона. Для условий табл. 20.2 минимально допустимое снижение относительно расхода цемента составит 0,64, для достижения большей экономии необходимо применение микрозаполнителей.

Таблица 20.2. Относительные показатели расхода цемента в бетонах на различных цементах

Бетонная смесь	Относительный показатель расхода цемента					
	в бетонной смеси без добавки			в бетонной смеси с суперпластификатором		
	при марке цемента					
	400	500	600	400	500	600
Жесткая	0,77	0,66	0,59	0,6	0,52	0,46
Подвижная	1	0,85	0,76	0,77	0,66	0,59
Литая	1,27	1,09	0,97	1	0,85	0,85

Важное значение имеет правильное назначение класса бетона. Завышение его, что иногда имеет место в связи с неблагоприятными условиями последующего твердения или для передачи усилий преднапряжения на горячий бетон, ведет к перерасходу цемента. Расход цемента М400 в бетоне прочностью 30 МПа по сравнению с бетоном прочностью 20 МПа возрастает на 31%, 40 МПа — на 64%, 50 МПа — на 102%. Окончательное суждение о правильности принятого решения требует, однако, учета различных факторов, а не только расхода цемента на 1 м³ бетона. Применение бетона высокой прочности позволяет уменьшить размеры некоторых изделий и тем самым снизить расход бетона на их изготовление, шире использовать предварительное напряжение арматуры. В этом случае необходимо учитывать расход цемента на единицу чистой продукции, а также принимать во внимание другие положительные факторы, полученные за счет применения более легких и прогрессивных конструкций.

При выборе решений необходимо учитывать как интересы конкретного производства, так и общий народнохозяйственный эффект. Повышение марки цемента ведет к снижению его расхода в бетоне, однако цемент высоких марок производит ограниченное количество заводов. Применение этого цемента для бетонов низких и в ряде случаев даже для средних марок не только может привести к его нерациональному использованию из-за невозможности значительного снижения расхода цемента ввиду необходимости обеспечения плотности бетона, но вызывает резкое увеличение средней дальности перевозок цемента, потребности в вагонах, излишнее расширение складского хозяйства на заводах сборного железобетона. В результате экономический эффект, полученный за счет снижения расхода цемента, не покрывает возросших транспортных и других расходов. С точки зрения обеспечения максимального народнохозяйственного эффекта целесообразно разумно использовать в обычных бетонах рядовые марки цемента, одновременно широко применяя суперпластификаторы и другие химические добавки, качественные местные заполнители и рациональную технологию бетона. Цемент высоких марок применяют в высокопрочных и специальных бетонах при соответствующем технико-экономическом обосновании.

На долю цемента приходится большая часть суммарных энергетических затрат в производстве бетона. В среднем на производство 1 м³ тяжелого бетона расходуется 110...210 кг условного топлива: из них 65...75% топлива необходимо на производство цемента, 2...3% топлива расходуется на получение заполнителя, 10...15% — на различные технологические операции по изготовлению бетона и железобетонных изделий, 13...18% — на тепловую обработку изделий. Суммарный расход топлива увеличивается в основном из-за повышения расхода цемента, так как расход топлива на другие нужды практически изменяется мало, состав-

Таблица 20.3. Зависимость энергозатрат на производство бетона от его марки и вида цемента

Вид цемента	Средние затраты условного топлива, кг, приходящиеся на долю цемента в бетонах прочности, МПа			
	20	30	40	50
Портландцемент	70	95	130	165
Портландцемент с активными минеральными добавками	65	90	130	175
Шлакопортландцемент	45	60	80	105

ля в среднем 40...50 кг/м³. Возможное изменение средних энергозатрат на производство бетона показано в табл. 20.3 (при применении подвижных бетонных смесей).

Энергозатраты на производство бетона сокращаются с понижением его марки и особенно при применении шлакопортландцемента. Портландцемент с минеральными добавками эффективен в бетонах низких и средних марок. Необходимо также учитывать, что при применении этого цемента и шлакопортландцемента значительно уменьшается расход клинкера, наиболее дорогостоящего и энергоемкого компонента цемента, например расход клинкера на производство 1 м³ бетона прочностью 30 МПа составляет при применении портландцемента 290...350 кг (при разной подвижности бетонной смеси), а при применении шлакопортландцемента — 165...235 кг. Соответственно 1 кг клинкера в первом случае обеспечивает производство 2,85...3,45 м³, а во втором — 4,25...6,05 м³ бетона.

В легких бетонах при применении искусственных пористых заполнителей, на производство которых расходуется значительное количество топлива, возрастают общие энергетические затраты на производство бетона на 10...15% и относительная доля энергетических затрат, расходуемых на производство заполнителей, увеличивается до 20...50% при соответствующем уменьшении относительных затрат на цемент и технологические операции. В производстве легкого бетона для снижения суммарных энергозатрат помимо рассмотренных выше способов экономии цемента особое важное значение имеет применение менее энергоемких заполнителей, например термозита (вспученного шлака), природных легких заполнителей, поризация бетонной смеси.

Проведение мероприятий, направленных на экономию цемента, способствует снижению суммарных энергетических затрат в производстве бетона, более рациональному использованию материальных ресурсов. Снижение энергозатрат достигается также при сокращении продолжительности прогрева бетона, разумном снижении требований к отпускной прочности бетона (с учетом роста

прочности в последующем), применением комплексных добавок, содержащих ускоритель твердения и пластификатор, использованием пропарочных камер с минимальными теплотерями.

Значительную экономию цемента и снижение материальных и энергетических затрат можно получить при использовании в производстве бетона вторичного сырья промышленности (зол, шлаков) (см. гл. 14).

Необходимо всемерно бороться с потерями цемента на производстве. Эти потери возникают из-за применения горячего цемента с признаками ложного схватывания, неудовлетворительной организации транспорта и складирования цемента, смешивания цемента разных марок, низкого качества нерудных материалов, несовершенства формовочного оборудования и изготовления изделий с завышенной толщиной. Четкая организация производства позволяет сократить непроизводительные потери и сэкономить до 10% цемента в год.

Для сокращения трудовых затрат в производстве бетона и сборных железобетонных изделий решающее значение имеют широкая механизация и автоматизация технологических операций, использование роботов, манипуляторов и управляющих автоматических комплексов. Для более рационального производства необходимо применение бетонных смесей с хорошей удобоукладываемостью, химических добавок, особенно суперпластификаторов и комплексных добавок на их основе, применение для производства ряда изделий литых бетонных смесей.

С современных условиях имеется широкий выбор средств и мероприятий, обеспечивающих экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов в технологии бетона и сборного железобетона. Всемерная экономия всех видов ресурсов — задача разносторонняя, и ее решение требует комплексного подхода, высокой организованности действий всех участников производственного процесса.

§ 20.3. РЕМОНТ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

При эксплуатации в тяжелых условиях и в ряде других случаев возможно появление повреждений бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

■ Эти повреждения могут быть четырех видов: 1) общее разрыхление структуры, в частности изменение характера порового пространства за счет увеличения числа более крупных пор и появления мельчайших дефектов, вызывающее снижение прочности бетона и предшествующее более глубоким и опасным разрушениям; 2) отслоение защитного слоя, разрушение поверхностных слоев бетона, образование на поверхности изделий каверн и пустот; 3) появление трещин, неплотностей и других разрушений в более глубоких слоях бетона; 4) значительная коррозия арма-

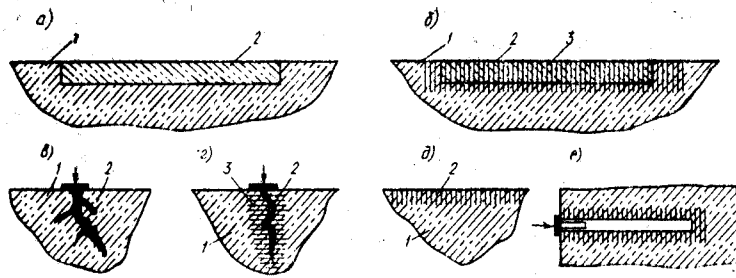


Рис. 20.2. Схемы ремонта поврежденных бетонных и железобетонных конструкций:

а — ремонт бетонного покрытия 1 вновь уложенным бетоном; б — то же, но с пропиткой 3 вновь уложенного слоя и прилегающей поверхности старого бетона для повышения сцепления и долговечности; в — залечивание трещины в бетоне 1 полимером или полимерраствором 2; г — то же, но с пропиткой прилегающих объемов старого бетона; д — пропитка полимером ослабленной поверхности бетона; е — пропитка дефектных зон бетона через внутренние шурфы

туры, обрыв предварительно напряженных стержней, коррозия закладных деталей.

В зависимости от характера повреждений применяют различные технологические приемы (рис. 20.2) и материалы для ремонта. Если на поверхности образовались значительные дефекты, то поврежденный участок очищают от разрушившегося бетона (до бетона с доброкачественной структурой) и затем бетонируют новым бетоном. Чаще всего используют мелкозернистые бетоны на основе высокопрочных цементов с эффективными комплексными добавками, быстротвердеющих специальных цементов, в том числе безгипсовых тонкомолотых цементов со специальными добавками, которые схватываются через 10 ... 30 мин; жидкого стекла, серы и некоторых специальных вяжущих. Широко применяют для ремонта полимеррастворы, возможно использование фибробетона.

При ремонте необходимо особое внимание уделять созданию прочной связи между отремонтированным участком и основной конструкцией. Так как прочность сцепления между старым и новым бетоном невелика и редко превышает 0,5 ... 1 МПа, то применяют специальные мероприятия, способствующие усилению связи между ними. Конфигурация участка, подвергнутого бетонированию, должна способствовать получению прочного объема бетона, т. е. иметь достаточную толщину и заглубление края. Лучшие результаты получают, если ремонтируемый участок армируют стальной сеткой, которую специальными дюбелями пристреливают к основной конструкции или прочно прикрепляют к ней другими способами. Старый бетон перед бетонированием очищают, промывают, стремясь обнажить заполнитель и получить шероховатую поверхность. В ряде случаев используют промежуточный слой, способствующий улучшению сцепления, например нанесение тонкого слоя полимерных композиций на основе

эпоксидной смолы или слоя коллоидного цементного клея с эффективными химическими добавками, повышающими адгезию материалов. Значительное повышение сцепления достигается последующей пропиткой нового и старого бетона полимеризующимися составами. При этом возрастают плотность, прочность и долговечность отремонтируемой конструкции.

Пропитку бетона специальными составами проводят также для восстановления свойств бетона при повреждении его поверхностных слоев вследствие воздействия атмосферных или агрессивных факторов. В зависимости от структуры бетона и характера ее разрыхления используют составы разной вязкости. Маловязкие составы на основе метилметакрилата или стирола хорошо «залечивают» мельчайшие дефекты и повышают непроницаемость и долговечность поверхности бетона. Более вязкие составы, включающие мономер и полимер «залечивают» более крупные дефекты и поры и понижают проницаемость менее плотных бетонов. Для полимеризации составов непосредственно в теле бетона применяют поверхностный нагрев или специальные комплексные катализаторы, обеспечивающие полимеризацию при обычной температуре. Возможно использование для пропитки и неорганических веществ: серы, составов на основе жидкого стекла и др.

Для заделки трещин и дефектов в глубине конструкции применяют нагнетание в них специальных составов. При значительных размерах дефектов используют составы на неорганических веществах: высокопрочном или тампонажном цементе, жидком стекле и др. Для залечивания более мелких дефектов широко применяют составы на основе полимеров. В зависимости от размеров дефектов и их состояния (сухие или влажные) используют различные составы (табл. 20.4).

Для ремонта используют специальное оборудование и технологию (рис. 20.3). На поверхность конструкции в местах ремонта наносят поверхностное герметизирующее покрытие, оставляя в нем отверстия для подачи пропитывающего состава. Затем с помощью специальных устройств через эти отверстия в бетон нагнетают пропитывающий состав. В одних устройствах смола и отвердитель смешиваются непосредственно в смесительной го-

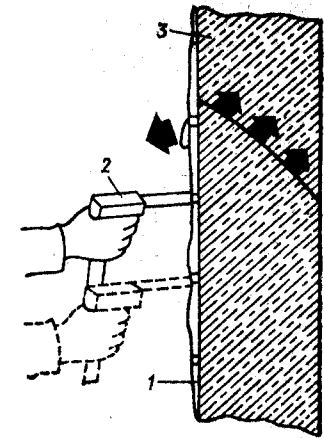


Рис. 20.3. Ремонт трещин и неплотностей в бетонных и железобетонных конструкциях:

1 — поверхностное герметизирующее покрытие с отверстиями для подачи пропитывающего состава; 2 — смесительная головка; 3 — бетонная конструкция

Таблица 20.4. Композиции для ремонта бетонных и железобетонных конструкций

Компоненты составов	Содержание компонентов, мас. ч., в составах для					
	пропитки		заделки трещин		ремонта объемных дефектов	
Метилметакрилат	100	100	100	100	100	100
Жидкий каучук СКН	—	—	30	30	—	20...40
Полиэфир ТГМ-3	30	—	10	30	—	—
Полистирол	—	5...7	—	—	5...7	—
Эпоксидная смола ЭД-16, ЭД-20	—	—	—	100	—	100
ФАЭС или ФАЭД-20	—	—	—	—	100	—
Алифатический олигомер ДЭГ-1	—	—	—	10	—	—
Парафин	—	0,5	—	0,5	—	0,5
Перекись бензонла	—	5...8	—	—	—	6...8
Диметиланлин	—	2...3	—	—	—	2...3
Порофор 4ХЗ	0,5...1,5	—	—	—	—	—
Гипериз	—	—	5...6	5...6	—	8...10
Полиэтиленполиамин	—	—	5...6	5...6	—	—
ГМДА	—	—	—	—	20...25	—
Дибутилфталат	—	—	—	—	—	—
Ацетон	—	—	—	—	—	5...10
Тонкомолотый наполнитель	—	—	—	10...30	—	10...30
Кварцевый песок	—	—	—	10...100	50...200	100...300
	—	—	—	—	—	50...100
	—	—	—	—	—	100...300
	—	—	—	—	—	50...100
	—	—	—	—	—	100...300
	—	—	—	—	—	50...100

ловке, в других производят предварительное смешивание компонентов в специальных смесителях и затем через рабочую головку нагнетают готовую смесь в бетон под значительным давлением. Применяют составы со скоростью затвердевания от 10 мин до нескольких часов и прочностью 20...120 МПа в зависимости от условий ремонта и требований, предъявляемых к прочности конструкции.

В современных условиях все большее применение для ремонта находят композиции на основе полимерных связующих, свойства которых можно изменять в широких пределах. Для этого в их состав вводят различные вещества, изменяют соотношения между составными частями композиции. Одни вещества способствуют ускорению или замедлению затвердевания композиции, другие — пластифицируют смесь, улучшают ее адгезию к бетону, третьи — задерживают старение и т. д. В табл. 20.4 приведены примеры полимерных композиций, применяемых при ремонте железобетонных конструкций.

При повреждении арматуры в каждом конкретном случае должны разрабатываться специальные предложения по ремонту, учитывающие назначение конструкции, характер повреждения, условия ремонта. После восстановления арматуры или ее замены проводят бетонирование защитных слоев бетона и при необходимости осуществляют меры по улучшению структуры и свойств отремонтированных участков конструкции рассмотренными выше способами.

С каждым годом возрастает разнообразие бетонов, вяжущих веществ, заполнителей, технологических приемов производства сборного и монолитного железобетона, применяемых в строительстве. Поэтому в учебное пособие включены в первую очередь материалы, позволяющие глубже понять процессы формирования структуры и свойств различных бетонов, в том числе с химическими добавками, принципы и методы технологических расчетов и проектирования состава бетона различных видов, вопросов контроля качества, применения математических методов, использования вторичного сырья промышленности, перспектив развития технологии бетона. Знания по технологии бетона могут быть расширены за счет самостоятельного изучения литературы из прилагаемого списка, а также статей из журнала «Бетон и железобетон».

Технология бетона заметно развивается. На производстве имеются значительные резервы для ее совершенствования. Получат применение новые виды вяжущих, позволяющих обеспечить быстрое твердение бетона, сокращение сроков изготовления железобетонных изделий, в том числе предварительно напряженного железобетона. Более широко будут использоваться в технологии бетона химические добавки, в первую очередь суперпластификаторы и комплексные добавки на их основе. Увеличится выпуск добавок С-3, 40-03, ЛСТМ-2 и др. Это позволит расширить производство высокопрочных и высокоподвижных бетонов и литых бетонных смесей, обеспечить значительную экономию цемента, улучшить условия труда на предприятиях, будет способствовать механизации и автоматизации производства.

Будет проводиться значительная модернизация оборудования для приготовления бетонной смеси с комплексной автоматизацией процесса, с использованием активации цемента, сухих смесей, приближения приготовления смеси к месту ее укладки.

При формировании сборного железобетона получит более широкое развитие применение низкочастотных режимов виброколебаний с частотой до 25 Гц, способов безвибрационного уплотнения. Нуждаются в дальнейшем совершенствовании технология отделки железобетонных изделий, повышение качества их поверхности.

Необходимо многое сделать в улучшении тепловлажностной обработки изделий, сокращении топливно-энергетических затрат в производстве сборного железобетона. Наряду с модернизацией

пропарочных камер с целью сокращения теплотерь будут введены более прогрессивные режимы тепловой обработки с использованием средств ее автоматизации, применяться эффективные способы тепловой обработки с использованием продуктов сгорания природного газа, солнечной энергии, электроэнергии, высокоэффективных инвентарных тепловых установок.

В производстве сборного железобетона будут развиваться конвейерная и кассетно-конвейерная технология, технологические линии с непрерывным армированием изделий, линии безопалубочного изготовления предварительно напряженных изделий на специальных стендах, производство изделий с использованием высокоподвижных и литых бетонных смесей.

Увеличится объем изготовления конструкций из монолитного бетона. Использование эффективной инвентарной опалубки, арматурных каркасов заводского изготовления, сухих бетонных смесей, эффективных способов приготовления и транспортирования бетонной смеси, комплексных химических добавок, обеспечивающих твердение бетона при широких изменениях температуры, — все это позволяет существенно повысить эффективность монолитного бетона.

Сегодня необходим творческий инициативный подход к решению задач технологии бетона, позволяющий коренным образом перестроить и усовершенствовать производство сборного и монолитного железобетона. Достижения советской науки и техники в области технологии бетона открывают широкие возможности для работы в этом направлении.

Для успешного решения производственных задач необходимы глубокие и всесторонние профессиональные знания. Автор надеется, что настоящее учебное пособие поможет студентам в их учебной и последующей работе на производстве, а инженерам-строителям-технологам окажет помощь в решении стоящих перед ними важных задач по коренному совершенствованию производства сборного и монолитного железобетона.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ

Для ориентировочной оценки эффективности применения в бетоне суперпластификаторов можно пользоваться приведенными ниже таблицами [46].

Таблица 1. Технологические, экономические и социальные показатели эффективности, достигаемые за счет применения СП в сборных железобетонных конструкциях

Наименование показателей	Наличие показателей эффективности и их величины	
	при В/Ц=const	при ОК=const
Сокращение времени и интенсивности вибрации (либо сокращение числа вибраторов; в отдельных случаях отказ от вибрации), раз	3...5	1,3...1,5
Сокращение продолжительности формирования изделий, конструкций, сооружений, раз	2,5...3	1,2...1,3
Экономия электроэнергии при приготовлении, транспортировании и укладке бетонной смеси, раз	2,5...3,5	1,1...1,3
Снижение трудозатрат при изготовлении изделий, раз	2...3	1,2...1,4
Увеличение срока службы вибраторов, форм, сокращение затрат на их ремонт, раз	1,5...2	1,1...1,3
Снижение металлоемкости форм (при проектировании), раз	1,1...1,2	—
Улучшение поверхности изделий, уменьшение количества пор (при горизонтальном формировании), раз	1,1...1,3	1,05...1,15
Уменьшение операций по доделке готовых изделий, раз	1,1...1,3	1,05...1,15
Сокращение режима ТВО, в том числе до передачи усилия обжатия арматуры на бетон (для преднапряженных конструкций), ч	—	≥2...5
Снижение температуры изотермического прогрева, °С	10...15	15...25
Экономия пара, %	10...15*	15...20
Увеличение оборачиваемости форм (сокращение сроков снятия опалубки) и коэффициента использования оборудования, %	5...10	10...20

Наименование показателей	Наличие показателей эффективности и их величины	
	при В/Ц=const	при ОК=const
Увеличение производительности труда (выпуска продукции), %	10...30	30...50
Сокращение парка форм, %	5...10	10...20
Экономия цемента**, %	—	15...25
Улучшение условий труда, снижение уровня шума и вибровоздействий, раз	3...5	1,3...1,5
Замена цемента на более низкую марку (или на ШПЦ той же марки)	—	+
Замена крупного плотного заполнителя на менее плотный	—	+
Замена крупного заполнителя на мелкий	+***	+
Снижение себестоимости продукции, руб/м³	1,2...5	4...8

* При использовании литых бетонных смесей иногда целесообразно увеличивать время предварительной выдержки за счет сокращения на тот же период времени изотермического прогрева.

** Использование СП только в целях экономии цемента рекомендуется осуществлять в тех случаях, когда стоимость его высока и расходы, связанные с применением СП, значительно перекрываются стоимостью сэкономленного цемента. Ориентировочные показатели экономии цемента в бетонах различных марок даны в табл. 4.

*** В случае применения литых смесей замену части крупного заполнителя (15...10%) на мелкий целесообразно проводить с целью снижения распадаемости бетонной смеси.

Примечания: 1. За эталон приняты бетонная смесь с ОК=2 ... 4 см и бетон без добавок.

2. Знак «+» означает наличие эффекта, знак «-» — его отсутствие.

Таблица 2. Технологические, экономические и социальные показатели эффективности, достигаемые за счет применения СП в монолитном строительстве

Наименование показателей	Бетонирование набивных свай напорным методом (аналог ВПТ)	Безвибрационное бетонирование зданий в скользящей опалубке (аналог — традиционная технология)	Безвибрационное бетонирование зданий в щитовой переставной опалубке (аналог — традиционная технология)
Снижение расхода основных строительных материалов:			
бетона, %	9	—	—
арматуры, %	6	—	—
Снижение затрат на механизацию, %	—	5	3
Снижение энергозатрат, %	23	15	11
Увеличение себестоимости бетона, %	2,0	2,0	2,0
Снижение себестоимости бетонирования, %	22	7	6
Сокращение сроков строительства	В 2,2 раза	В 1,05 раза	В 1,1 раза
Снижение удельных капитальных вложений, %	11	4	4

Примечание. За эталон приняты бетонная смесь и бетон без добавок.

Таблица 3. Показатели качества бетонных смесей и бетонов с добавками СП

Свойства бетонных смесей и бетонов	Ориентировочные показатели качества бетонных смесей и бетонов с СП, %				
	М300...М500		М600...М800		мелкозернистых М200...М300
	при ОК, см				
	2...4	≥20	2...4	2...4	15...20
Водоцементное отношение	80	100	75	80	100
Удобоукладываемость	70	20	70	70	25
Воздухосодержание	101,5	103	101	102	104
Предел прочности при сжатии	125	100	130	120	100
Коэффициент призмной прочности	105	95	100	100	95
Прочность при осевом растяжении	105	100	105	105	100
Прочность на растяжение при изгибе	105	100	105	105	100
Начальный модуль упругости	100	95	100	100	100
Деформации усадки	100	110	110	100	105
Деформации ползучести	95	110	110	75	120
Водопоглощение	70	100	75	70	85
Водонепроницаемость	300	100	300	200	110
Морозостойкость	130	100	130	120	100
Коррозионная стойкость в сульфатных средах	—	—	—	125	100
Стойкость в условиях капиллярного подсоса	130	100	130	—	—
Защитное действие по отношению к арматуре	125	100	—	—	—

Примечания: 1. Показатели приведены для бетонов с оптимальной дозировкой СП С-3.

2. За 100% приняты показатели качества для бетонов эталонного состава без СП с ОК=2...4 см.

Таблица 4. Ориентировочные величины снижения расхода цемента в бетонах различных марок при использовании суперпластификатора С-3

Марка бетона	ОК, см	Снижение расхода цемента, %, при введении суперпластификатора С-3 в количестве, %		
		0,4	0,8	1,2
М200	2...4	2...3	3...5	5...7
	4...5	3...4	5...7	7...9
	12...14	4...6	7...9	10...12
	22...24	6...8	10...12	12...15
М300	2...4	3...5	4...6	6...8
	4...5	4...6	8...10	10...12
	12...14	5...7	10...12	12...15
	22...24	12...15	18...20	20...22
М400	2...4	6...8	8...10	10...12
	4...5	8...10	10...12	12...15
	12...14	10...12	12...14	15...18
	22...24	12...15	18...20	20...25
М500	2...4	10...12	16...18	18...20
	4...5	12...15	18...20	20...22
	12...14	15...18	20...22	22...25
М600	2...4	12...14	18...20	20...22
	4...5	14...16	20...22	22...25

Примечание. Пониженная величина снижения расхода цемента в бетонах низких марок, особенно приготовленных из малоподвижных бетонных смесей, обуславливается требованиями получения должной плотности бетона, обеспечивающей его долговечность, которые ограничивают возможности снижения расхода цемента (нормы устанавливают минимально допустимый расход цемента). В этом случае эффективность применения суперпластификаторов может быть увеличена за счет введения в бетон микронаполнителей (золы, молотых шлаков, песка, отходов камнедробления и др.), позволяющих получить плотный бетон при пониженных расходах цемента. Выбор микронаполнителей необходимо обосновывать технико-экономическим расчетом с учетом влияния микронаполнителей на долговечность бетона и коррозию арматуры в железобетоне.

Таблица 5. Стоимость суперпластификаторов

Марка СП	Стоимость СП (сухого продукта), руб.
С-3	340
МФ-АР	366*
10-03	1115
40-03	246
Дофен	295

* Стоимость 20 %-ного раствора.

1. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. М., 1968
2. Ахвердов И. Н. Железобетонные центрифугированные трубы. М., 1967.
3. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. М., 1981.
4. Баженов Ю. М. Бетонополимеры. М., 1983.
5. Баженов Ю. М., Вознесенский В. А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. М., 1974.
6. Баженов Ю. М., Комар А. Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М., 1984.
7. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М., 1974.
8. Боженков П. И. Технология автоклавных материалов. Л., 1978.
9. Болдырев А. С., Добужинский В. И., Рекитар Я. А. Технический прогресс в промышленности строительных материалов. М., 1980.
10. Бронников П. И. Объемно-блочное домостроение. М., 1979.
11. Бужевич Г. А. Легкие бетоны на пористых заполнителях. М., 1970.
12. Горчаков Г. И., Баженов Ю. М. Строительные материалы. М., 1986.
13. Горчаков Г. И. Строительные материалы. М., 1981.
14. Зелепин В. И. Реконструкция ДСК. М., 1981.
15. Иванов И. А. Технология легких бетонов на искусственных пористых заполнителях. М., 1974.
16. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона (СН 277—80). М., 1981.
17. Инструкция по отделке фасадных поверхностей панелей для наружных стен (ВСН 66-89—76). М., 1977.
18. Ицкович С. М. Заполнители для бетона. Минск, 1983.
19. Комар А. Г. Строительные материалы и изделия. М., 1983.
20. Королев К. М. Производство бетонной смеси и раствора. М., 1973.
21. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты/В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев, М., 1980.
22. Косоогов А. М., Крюков Р. В. Пути развития и совершенствования полносборного домостроения. М., 1979.
23. Лещинский М. Ю. Испытание бетона. М., 1980.
24. Малинина Л. А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. М., 1977.
25. Марьямов Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона. М., 1970.
26. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. М., 1975.
27. Николаев С. В. Сборный железобетон. Выбор технологических решений. М., 1978.
28. Новгородский М. А. Пооперационный контроль при производстве железобетонных изделий и конструкций. М., 1967.
29. Носенко Н. Я. Механизация и автоматизация изготовления арматуры для железобетонных конструкций. М., 1970.
30. Попов А. Н. Бетонные и железобетонные трубы. М., 1973.
31. Ратнов В. Б., Розенберг Г. И. Добавки в бетон. М., 1973.
32. Рудерман П. Г. Экономическая эффективность заводского производства крупнопанельных изделий. М., 1976.
33. Руководство по подбору состава тяжелого бетона. М., 1979.

34. Руководство по применению химических добавок в бетоне. М., 1981.
35. Руководство по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий. М., 1974.
36. Руководство по технологии формирования железобетонных изделий. М., 1977.
37. Рыбьев И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. М., 1978.
38. Симонов М. З. Основы технологии легких бетонов. М., 1973.
39. Стефанов Б. В., Русанова Н. Г., Волянский А. А. Технология бетонных и железобетонных изделий. Киев, 1982.
40. Сизов В. Н., Киров С. А., Попов Л. Н. Технология бетонных и железобетонных изделий. М., 1972.
41. Состав, структура и свойства цементных бетонов/Г. И. Горчаков, Л. П. Орендликер, В. И. Савини и др. М., 1976.
42. Справочник по производству сборных железобетонных изделий/Под ред. К. В. Михайлова, А. А. Фоломеева. М., 1982.
43. Технология изделий из силикатных бетонов/А. В. Саталкин, П. Г. Комохов, К. В. Ломунов и др. М., 1972.
44. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер-М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М., 1979.
45. Шестоперов С. В. Технология бетона. М., 1977.
46. Рекомендации по применению добавок суперпластификаторов в производстве сборного и монолитного железобетона. НИИЖБ, ЦНИИОМТП. М., 1987.

Активация 319, 390
 Амплитуда вибрации 323
 Арболит 314
 Армоцемент 225
 Асбест 305

Бражка сульфитно-дрожжевая 44
 Бетон быстротвердеющий 229
 — высокопрочный 226
 — гидротехнический 234
 — декоративный 307
 — дорожный 238
 — для сборных железобетонных конструкций 224
 — крупнопористый легкий 277
 — легкий 258
 — литой 245
 — малощелебачный 242
 — мелкозернистый 246
 — на мелком песке 233
 — монолитный 328
 — морозостойкий 237
 — обычный 105, 196
 — поризованный 272
 — силикатный 286
 — с микрозаполнителями 241, 256
 — с поверхностно-активными добавками 214
 — тяжелый 196
 — цементно-полимерный 291
 — ячеистый 278
 Бетонирование зимой 336
 Бетонополимеры 297

Вибрация 324, 342
 Вибрация низкочастотная 326
 Вода в бетоне 65
 — для приготовления бетонной смеси 53
 — поливки бетона 53
 Водопотребность бетонной смеси 86
 — песка 41
 — щебня 41
 Воздух вовлеченный 155
 Выдержка предварительная 345
 Вязущее шлакощелочное 311
 Вязкость бетонной смеси 72

Газобетон 279
 Газобетонополимер 304
 Газосиликат 279
 Газообразователи 280
 Гель цементный 90
 Гидратация цемента 89
 Глубина коррозии 165
 Голография 370
 Гравий 35
 Густота нормальная 16

Деструкция бетона 190
 Детали сборные железобетонные 339
 Деформации
 — первоначальной усадки 141
 — ползучести 148
 — сжатия 145
 — растяжения 147
 — усадки 143
 — температурные 149
 Добавки
 — воздухововлекающие 45
 — гидрофобизирующие 45
 — гидрофобно-пластифицирующие 44
 — комплексные 48
 — кремнийорганические 45
 — пластифицирующие 44
 — полимерные 46
 — противоморозные 47
 — ускорители твердения 46
 Дозирование 319

Жесткость бетонной смеси 80
 Заполнители для бетона 24
 — крупный 37
 — легкий 38
 — мелкий 25
 — реакционноспособный к щелочам 177
 — рядовой 26
 — фракционированный 25
 Зола 312
 Золобетон 313

Известняки 37
 Известь воздушная 24
 Изделия (детали) сборные железобетонные 332
 Измерение деформаций 367
 Интенсивность вибрации 323
 Испытания
 — вибрационные 366
 — выдергиванием 359
 — молотком Кашкарова 361
 — — Шмидта 362
 — на отрыв 360
 — по отскоку 363
 — раскалыванием 358
 — реологические 70
 — ультразвуком 364
 — штампом 360

Кальций хлористый 47
 Камень цементный 92
 Кварц 33
 Керамзит 38
 Керамзитобетон 358
 Керамзитобетонополимер 304
 Класс бетона 122
 Контроль качества неразрушающими методами 356
 — — перемешивания 352
 — — пооперационный 351
 — — степени уплотнения 353
 Корректировка состава 208
 Коррозия
 — арматуры 169
 — I вида 157
 — II вида 159
 — III вида 162
 Кремнезем реакционноспособный 176
 Кренты 23
 Критерии эффективности 376

Латексы 292
 Марка бетона
 — по водонепроницаемости 152
 — — морозостойкости 154
 — — прочности 123
 Методика испытания 116
 Метилметакрилат 297
 Модели математические 379
 Модуль деформации 146
 Мономеры 297
 Морозостойкость 154

Натрий кремнефтористый 23

Однородность 137
 Пемза шлаковая 38
 Пенобетон 278
 Пенозолобетон 279
 Пенообразователи 280
 Пеносиликат 285
 Песок 33
 Перемешивание 319
 Планирование оптимальное 381
 — эксперимента 382
 Плотность бетона 150
 Подогрев заполнителей 319
 Пористость 151
 Проницаемость 151
 Пропаривание 343
 Прочность
 — динамическая 115
 — при изгибе 130
 — — сжатия 122
 — — растяжения 131
 Поливинилацетат 292
 Полиметилметакрилат 297
 Полимербетон 294
 Портландцемент белый 22
 — быстротвердеющий 19
 — пуццолановый 20
 — сульфатостойкий 20
 — цветной 22
 Пудра алюминиевая 280

Реология бетонной смеси 70
 Свойства бетона 108
 — бетонной смеси 80
 — бетонополимеров 303
 — заполнителя легкого 38
 — клинкерных материалов 15
 — цемента 19
 Силикат калия и натрия 23
 Смесь бетонная 53
 — песчано-графитная 37
 — цементно-песчаная 247
 Смолы
 — полиэфирные 294
 — формальдегидные 295
 — фурановые 294
 — эпоксидные 294
 Состав бетона нормальный 205
 — — производственный 210
 Сроки схватывания 17
 Стирол 297
 Структура бетона 99
 — бетонной смеси 53
 — бетонополимеров 298
 — контактной зоны 102

Структурообразование 88
 Суперпластификаторы 46
 Схватывание 90
 — ложное 17

Твердение бетона 96
 — в зимний период 185
 — при нормальной температуре 178
 Тензодатчики электрические 368
 Теория твердения 88
 — трещинообразования 109
 — разрушения 108
 Тесто цементное 55
 Технология агрегатная 349
 — конвейерная 349
 — кассетная 348
 Тиксотропия 72
 Транспорт бетонной смеси 331
 Трубы бетонные и железобетонные 339
 Туф 38

Удобоукладываемость 82
 Укладка бетонной смеси в конструкции 332
 Уплотнение вибрацией 323
 — без вибрации 327
 Управление качеством 351
 Уход за бетоном 335

Фибробетон 305
 Формование из горячих смесей 346
 — изделий 340
 — объемных изделий 344

Цемент кислотоупорный 23
 — напрягающий 22
 — расширяющийся 23
 — фосфатный 23

Шлаки 311
 — агломерированные 38
 — доменные 38
 — доменные вспученные 311
 Шлакопортландцемент 19

Щебень
 — из природного камня 38
 — искусственного камня 38
 — для бетона шлаковый 38

Экзотермия цемента 18
 Экономия цемента 391
 Электропрогрев 344
 Энергосбережение 394

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Глава 1. Основные сведения о бетоне	6
§ 1.1. Общие положения	6
§ 1.2. Основные этапы развития технологии бетона	7
§ 1.3. Классификация бетонов	11
Глава 2. Материалы для бетона	14
§ 2.1. Вяжущие вещества	14
§ 2.2. Заполнители для бетона	24
§ 2.3. Добавки к бетонам	43
§ 2.4. Вода для приготовления бетонной смеси	53
Глава 3. Бетонная смесь	53
§ 3.1. Структура бетонной смеси	53
§ 3.2. Реологические свойства бетонной смеси	70
§ 3.3. Технологические свойства бетонной смеси	80
§ 3.4. Зависимость подвижности и жесткости бетонной смеси от различных факторов	84
Глава 4. Структурообразование бетона	88
§ 4.1. Формирование структуры бетона	88
§ 4.2. Структура бетона	89
Глава 5. Прочность бетона	105
§ 5.1. Особенности поведения бетона под нагрузкой	105
§ 5.2. Методика испытаний	116
§ 5.3. Прочность бетона при сжатии	122
§ 5.4. Обобщенная зависимость прочности бетона от водоцементного отношения и других факторов	127
§ 5.5. Прочность бетона на растяжение при изгибе	130
§ 5.6. Зависимость прочности бетона от его состава	131
§ 5.7. Однородность бетона по прочности	137
Глава 6. Деформативные свойства бетона	141
§ 6.1. Первоначальная усадка бетонной смеси	141
§ 6.2. Усадка бетона	143
§ 6.3. Модуль упругости и деформации бетона при кратковременном нагружении	145
§ 6.4. Деформации ползучести	148
§ 6.5. Температурные деформации	149
Глава 7. Физические свойства бетона	150
§ 7.1. Плотность бетона	150
§ 7.2. Проницаемость бетона	151
§ 7.3. Морозостойкость бетона	154
Глава 8. Коррозия бетона и меры борьбы с ней	156
§ 8.1. Особенности воздействия агрессивных сред на бетон и железобетон	156

§ 8.2. Виды коррозии бетона в жидкой агрессивной среде	157
§ 8.3. Прогнозирование глубины разрушения бетона при коррозии	165
§ 8.4. Коррозия арматуры в бетоне	169
§ 8.5. Коррозия бетона при действии щелочей цемента на кремнезем заполнителя	176
Глава 9. Влияние температуры на твердение бетона	178
§ 9.1. Твердение бетона при нормальной температуре	178
§ 9.2. Твердение бетона в зимний период	185
§ 9.3. Твердение бетона при повышенных температурах	187
Глава 10. Проектирование состава тяжелого бетона	196
§ 10.1. Основные положения единой методики определения состава бетона	196
§ 10.2. Выбор соотношения между мелким и крупным заполнителями	199
§ 10.3. Порядок расчета состава бетона	205
§ 10.4. Экспериментальная проверка состава бетона	206
§ 10.5. Определение производственного состава бетона	210
§ 10.6. Определение состава бетона по графикам и номограммам	212
§ 10.7. Определение состава бетона с химическими добавками	214
Глава 11. Проектирование состава разных видов тяжелого бетона	224
§ 11.1. Бетон для сборных железобетонных конструкций	224
§ 11.2. Высокопрочный бетон	226
§ 11.3. Быстротвердеющий бетон	229
§ 11.4. Бетон на мелком песке	233
§ 11.5. Бетон для гидротехнических сооружений	234
§ 11.6. Бетон для дорожных и аэродромных покрытий	238
§ 11.7. Бетон с тонкомолотыми добавками	241
§ 11.8. Малощебеночный бетон	242
§ 11.9. Литой бетон	245
Глава 12. Мелкозернистый бетон	246
§ 12.1. Особенности свойств мелкозернистого бетона	246
§ 12.2. Проектирование состава мелкозернистого бетона	252
§ 12.3. Мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций	255
§ 12.4. Мелкозернистый бетон с микрозаполнителем	256
Глава 13. Легкие бетоны	258
§ 13.1. Легкие бетоны на пористых заполнителях	258
§ 13.2. Поризованный легкий бетон	272
§ 13.3. Крупнопористый легкий бетон	277
§ 13.4. Ячеистый бетон	278
Глава 14. Особые виды бетона	286
§ 14.1. Силикатный бетон	286
§ 14.2. Цементно-полимерный бетон	291
§ 14.3. Полимербетоны	294
§ 14.4. Бетонополимеры	297
§ 14.5. Фибробетон	305
§ 14.6. Декоративный бетон	307
§ 14.7. Бетон с использованием вторичного сырья промышленности	311
§ 14.8. Арболит	314
Глава 15. Приготовление и уплотнение бетонной смеси	319
§ 15.1. Приготовление бетонной смеси	319
§ 15.2. Уплотнение бетонной смеси	322

Глава 16. Бетонирование монолитных конструкций	328
§ 16.1. Технология возведения монолитных конструкций	328
§ 16.2. Зимнее бетонирование	336
Глава 17. Сборный железобетон	339
§ 17.1. Основные виды сборного железобетона	339
§ 17.2. Формование сборных железобетонных изделий	340
§ 17.3. Тепловая обработка изделий	343
§ 17.4. Основные технологические схемы производства сборного же- лезобетона	348
Глава 18. Контроль качества бетона	351
§ 18.1. Организация контроля качества при производстве бетона и железобетонных изделий	351
§ 18.2. Неразрушающие методы контроля качества бетона	356
§ 18.3. Контроль за деформациями бетона	367
Глава 19. Математические методы в технологии бетона	373
§ 19.1. Статистические методы управления качеством бетона	373
§ 19.2. Основы математического моделирования	378
§ 19.3. Проектирование состава бетона по математическим моделям	382
Глава 20. Повышение эффективности бетона	388
§ 20.1. Совершенствование технологии бетона	388
§ 20.2. Экономия материальных, энергетических и трудовых затрат в технологии бетона	391
§ 20.3. Ремонт бетонных и железобетонных изделий	395
Заключение	400
Приложение	402
Литература	408
Предметный указатель	410