

В. И. Белан
А. С. Денисов

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

под редакцией д-р техн. наук, профессора В. И. Белана

Рекомендовано УМО Аграрных ВУЗов в качестве учебника
для Аграрных Университетов имеющих строительные специальности
и студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальности 2904 «Гидротехническое и мелиоративное строительство»

Новосибирск 2017

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

УДК 624.91

Василий Иванович Белан
Александр Сергеевич Денисов

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор: Быченко Ю.А.

Издательство: Редакционно-издательский отдел Новосибирского государственного аграрного университета, 630039, город Новосибирск, улица Добролюбова, дом 160.

Рецензенты: НИИ строительных материалов Томской Государственной архитектурно-строительной академии.

Изложены основные сведения, свойства строительных материалов, используемых в гидротехническом строительстве. Даны рекомендации по использованию строительных материалов при возведении грунтовых плотин в том числе и на мерзлых грунтах.

Систематизируются данные по бетонам, рассматриваются методы подбора и использования смесей и бетона. Приводятся сведения о геотекстиле и др. материалах.

© Белан В. И., Денисов А. С., 2017

© Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Промышленность строительных материалов является отраслью народного хозяйства, от которой зависит экономический потенциал страны.

Затраты на материалы составляют более половины общей стоимости строительно – монтажных работ и около 1/3 капитальных вложений в народное хозяйство.

Производство строительных материалов связано с добычей и переработкой огромного количества сырья. Только на минеральные материалы приходится более 25 % общих грузовых перевозок железнодорожным транспортом и более 57 % речным транспортом. Снижение массы материалов позволяет сократить транспортные затраты, укрупнить конструкции, уменьшить трудоемкость и стоимость строительства. Каждый процент снижения затрат на строительные материалы ежегодно экономит около 400 млн рублей (1989 г.).

Производство нерудных материалов достигло 970,6 млн м².

Возникла новая отрасль промышленности производство искусственных заполнителей для легких бетонов.

Получила широкое развитие промышленность рулонных кровельных и гидроизоляционных материалов.

В больших объемах производят теплоизоляционные материалы. Выпуск минераловатных изделий составил 21,5 млн м².

В нашей стране производится большой объем листового стекла. В 1980 г. было выпущено 245 млн м².

Состояние промышленности строительных материалов определяет возможности выполнения современных экономических и экологически безопасных строительных объектов для любых климатических регионов страны. В связи с этим настоятельно необходима подготовка высококвалифицированных и эрудированных специалистов – строителей, владеющих всем комплексом знаний о полных возможностях строительных материалов и прогрессивных технологиях их получения. Это положение еще больше относится к обучению инженеров – строителей объектов гидро. теплоэнергетики, атомных станций, а также выполняющих комплексное развитие всей промышленной базы строительства и формирующих жилую зону таких территориально-промышленных узлов. Исходя из современных прогнозов развития энергетической базы страны основными объектами строительства были и остаются регионы Сибири, Крайнего Севера. Заполярья и Дальнего Востока. Здесь концентрируются основные запасы природного сырья, гидроресурсов, энергетических углей, что необходимо для повышения индустриального потенциала страны. Регионы характерны спецификой климатических условий выполнения строительных работ и эксплуатации зданий и сооружений. В своем большинстве строительство таких объектов выполняется в районах с малоосвоенной природной средой, что требует максимального учета экологических факторов получения и применения строительных материалов.

При значительном количестве выпущенных и заявленных к изданию учебников по курсу «Строительные материалы» необходимо отметить отсутствие такого издания для подготовки инженеров – строителей указанного профиля. Имеется лишь учебник «Строительные материалы» для техникумов гидротехнического строительства, 1986 г. Гидротехническое и энергетическое строительство является наиболее динамичным, использующим как традиционные, так и прогрессивные материалы с повышенными эксплуатационными показателями. Для подобных объектов строительства является важным тщательный выбор сырья, всесторонняя проверка их свойств исходя из экстремальных условий эксплуатации в конкретных географических регионах. В условиях ужесточения экономических показателей актуальным является правильное вовлечение в строительство вторичных ресурсов и нетрадиционных видов сырья. Все это определяет необходимость подготовки современного учебника, который бы дал возможность вовлечь в учебный процесс эти необходимые области материаловедения.

Большинство выпущенной учебной литературы по дисциплине «Строительные материалы» для ВУЗов подготовлены группами авторов, работающих в европейской части страны без отражения всех особенностей строительства в восточной зоне. В связи с этим наиболее перспективный для строительства регион оставлен без адаптированного для этих условий учебного обеспечения и обедняет учебный процесс в центральных вузах. Необходимо отметить, что в регионе Сибири и Дальнего Востока сосредоточено большое количество вузов и факультетов выпускающих большую часть инженерно-строительных кадров. Учебные и научные центры этого края создали современные строительные технологии и материалы для жестких условий Сибири и Севера, получившие отечественное и мировое признание, но не нашедшие своего отражения в учебной литературе по подготовке современных инженеров-строителей. Примером может быть отсутствие информации о теории и технологии электропроводных материалов /СибНИИЭ, инст. теплофизики СО РАН академик Вершинин Ю. Н., член-корреспондент Пугачев Г. А./, теория клееной и модифицированной древесины и ее производных /НГАС, академик Хрулев В. М./, теория зимнего бетонирования разработана и внедрена в НГАС /д. т. н. Арбенев Ю. А., теория бетонирования массивных гидротехнических объектов /НГАС, докт. Зубов В. И./, современные физико-химические методы исследования /НГАС, академик Бердов Г. И./, теория формирования структуры бетона /ТГАС, д. т. н. Кудяков А. И./ и т. д. Переход высшего образования на многоуровневую подготовку специалистов требует выпуска подобной книги, способствующей углубленной подготовке современных специалистов.

Происходящие процессы структурной перестройки предприятий отрасли строительных материалов, строительных министерств, переход на рыночные отношения вскрыл отдельные недочеты в номенклатуре несовершенства ряда технологий по выпуску строительных материалов. Имеющиеся учебники «Строительные материалы» были написаны для условий ведения планового централизованного строительства, что не позволяет в полной мере применять их в современной экономической ситуации. Требуется введение в учебный процесс передового зарубежного опыта, что также ставится целью подготавливаемого пособия.

Технический прогресс промышленности строительных материалов связан с применением математических методов, современной вычислительной техники, роботизации процессов, чему в учебной литературе уделяется необоснованно мало внимания. Данная тема может быть предметом специальной монографии, но в целях скорейшего информационного обеспечения учебного процесса, авторы вводят отдельные разделы по данному вопросу.

Напряженность экологической обстановки, повышенная загрязненность природной среды в нашей стране объясняется еще и тем, что почти полностью разделено преподавание курса технических и экологических дисциплин, в то время как на деле они находятся в полном единстве. Необходимый минимум современных сведений содержит каждый раздел учебника.

Комплексный подход к изложению материала, включение последних научных разработок по современному материаловедению позволит обеспечить процесс подготовки инженеров современным учебником, отражающим состояние отечественной отрасли строительных материалов на момент начала XXI века.

Ускорение научно-технического прогресса может происходить при подготовке квалифицированных специалистов, владеющих со всей полнотой последними достижениями науки и техники. Гидротехническое строительство является той отраслью строительства, где необходимость в передовых материалах и передовых технологиях проявляется в наибольшей мере.

Авторы старались представить в книге современное состояние, перспективы и тенденции применяемых материалов в современном гидротехническом строительстве. Это второе издание дополненное современными требованиями и достижениями в области материаловедения. Первое издание было рекомендовано в качестве учебника Ассоциацией строительных ВУЗов.

В начале XXI века задаются вопросом о будущих строительных материалах. Бурное развитие науки и техники затрудняют прогнозирование: ещё четыре десятилетия назад не было

широкого применения полимерных строительных материалов, а о современных «истинных» композитах было известно только узкому кругу специалистов. Тем не менее, можно предположить, что основными строительными материалами будут металл, бетон, железобетон, керамика, стекло, древесина и полимеры. Строительные материалы будут создаваться на той же сырьевой основе, но применением новых рецептур, компонентов и технологических приёмов, что даст более высокое эксплуатационное качество и соответственно долговечность и надёжность. Будет максимальное использование отходов различных производств, отработавших изделий, местного и домашнего мусора. Строительные материалы будут выбираться по экологическим критериям, а их производство будет основываться на безотходных технологиях.

Уже сейчас имеется обилие фирменных названий отделочных, изоляционных и других материалов, которые в принципе отличаются только составом и технологией. Этот поток новых материалов будет увеличиваться, а их эксплуатационные свойства совершенствоваться с учётом суровых климатических условий и экономии энергетических ресурсов России.

*В. И. Белан
А. С. Денисов*

1. СОСТАВ, СТРУКТУРА, ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Механические свойства

Наиболее важными для строительных материалов являются механические свойства, характеризующие их отношение к внешним силовым воздействиям. В эту группу входят деформативные и прочностные свойства, определяющие соответственно способность материалов сопротивляться деформированию и разрушению под действием в основном внешних сил. Эти свойства непосредственно зависят от структуры материала, сцепления между частицами и особенностей теплового движения частиц.

1.1.1. Деформационные свойства

Основными деформационными свойствами строительного материала являются: упругость, пластичность, модуль упругости (модуль Юнга), коэффициент Пуассона, модуль сдвига, предельные деформации (растяжение, сжатие), ползучесть.

Упругостью твердого тела называется его свойство деформироваться под влиянием нагрузки и самопроизвольно восстанавливать первоначальную форму после прекращения действия внешней силы.

Упругая деформация полностью исчезает после прекращения действия внешней силы, поэтому ее принято называть обратимой.

Пластичностью твердого тела называют его свойство изменять форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, причем после прекращения действия силы тело не может самопроизвольно восстановить свои размеры и форму, и в теле остается некоторая остаточная деформация, называемая пластической.

Хрупкость – свойство твердых тел разрушаться при механических воздействиях без значительной пластической деформации.

Внешние силы изменяют межатомные расстояния, отчего происходит изменение размеров деформируемого тела на величину Δl в направлении действия силы. Относительная деформация ε равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Модуль упругости E (модуль Юнга) связывает упругую деформацию ε и одноосное напряжение соотношением, выражающим закон Гука:

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (1.1)$$

При одноосном растяжении напряжение определяется по формуле:

$$\sigma = P / F,$$

где P – действующая сила; F – площадь первоначального поперечного сечения элемента.

Модуль упругости материала E связан с другими его характеристиками посредством коэффициента Пуассона. Одноосное растяжение σ_z вызывает удлинение на этой оси $+\varepsilon_z$ и сжатие по боковым осям $-\varepsilon_x$ и $-\varepsilon_y$, которые у изотропных материалов равны между собой.

Коэффициент Пуассона или коэффициент поперечного сжатия равен отношению:

$$\mu = \varepsilon_x / \varepsilon_z$$

Если бы объем материала при одноосном нагружении оставался постоянным, то наибольшее теоретическое значение $\mu = 0.5$.

Коэффициент Пуассона бетона $\mu = 0.17.. 0.2$;

полиэтилена $\mu = 0.4$.

Модуль сдвига связан с модулем Юнга посредством коэффициента Пуассона

$$G = E / [2(1 + \mu)],$$

$\mu = 0.2 - 0.3$, G составляет 35–42 % E .

Упругостью твердого тела называют его свойство самопроизвольно восстанавливать первоначальную форму и размеры после прекращения действия внешней силы. Упругая деформация полностью исчезает после прекращения действия внешней силы, поэтому ее принято называть обратимой.

Пластичностью твердого тела называют его свойство изменять форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, причем после прекращения действия силы тело не может самопроизвольно восстановить свои размеры и форму, и в теле остается некоторая остаточная деформация, называемая пластической деформацией.

Пластическую, или остаточную, деформацию, не исчезающую после снятия нагрузки, называют необратимой.

Основными характеристиками деформативных свойств строительного материала являются: модуль упругости (Юнга), коэффициент Пуассона, модуль сдвига, объемный модуль упругости (модуль всестороннего сжатия), предельные деформации (растяжения, сжатия и др.), ползучесть. Другие характеристики могут определяться для специальных условий нагружения.

Рассмотрим связь строения и деформативных свойств материала.

Внешние силы, приложенные к телу, вызывают изменение межатомных расстояний, отчего происходит изменение размеров деформируемого тела на величину Δl в направлении действия силы (при сжатии – укорочение, при растяжении – удлинение).

Относительная деформация ε равна отношению абсолютной деформации Δl к первоначальному линейному размеру l тела:

$$\varepsilon = \Delta l / l$$

Деформация происходит вследствие удаления или сближения атомов, причем смещения атомов пропорциональны деформации тела.

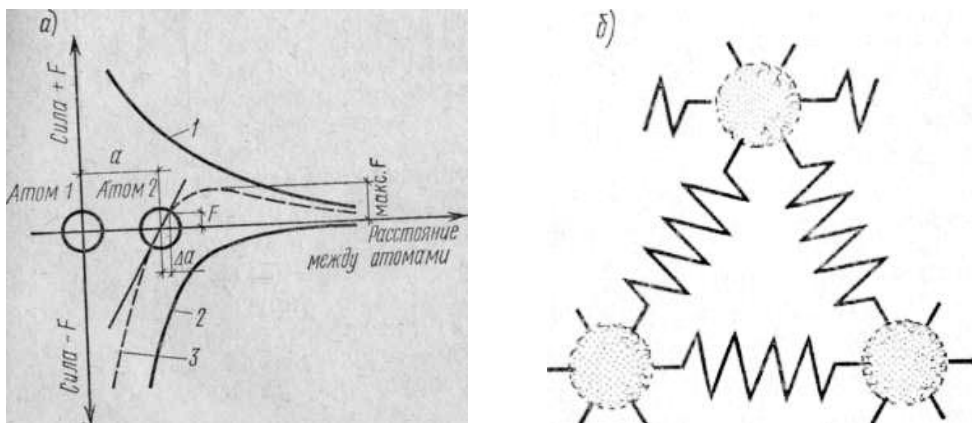


Рис. 1.1. Схема сил взаимодействия между атомами:

а – межатомные силы в зависимости от расстояния между атомами; б – пружинная модель; 1 – сила притяжения; 2 – сила отталкивания; 3 – результирующая сила

На частицы, из которых состоит твердое тело, одновременно действуют силы притяжения и силы отталкивания: кулоновская сила притяжения разноименных ионов и сила отталкива-

ния электронных оболочек (рис. 1.1. *а*). Результирующая сила F , равная сумме сил притяжения и отталкивания, изменяется в зависимости от межатомного расстояния. Ее изменение можно наглядно представить используя пружинную модель межатомных сил (рис. 1.1. *б*). Когда твердое тело не нагружено, межатомное расстояние остается постоянным (хотя атомы совершают непрерывные колебания) и результирующая сила равна нулю. При превышении равновесного межатомного расстояния (растяжение стержня) атомы находятся под действием сближающей силы. Наоборот, если расстояние между атомами уменьшается (сжатие стержня), то возникает отталкивающая сила сжатой пружины (см. рис. 1.1. *б*). Наклон производной $\frac{dF}{da}$ в точке O связан с величиной модуля упругости и по существу закон Гука является приближенным соотношением, отражающим характер межатомных взаимодействий в диапазоне упругих деформаций.

Модуль упругости E (модуль Юнга) связывает упругую деформацию ε и одноосное напряжение σ линейным соотношением, выражающим закон Гука

$$\varepsilon = \sigma / E$$

При одноосном растяжении (сжатии) напряжение определяется по формуле $\sigma = P / F$, где P – действующая сила, F – площадь первоначального поперечного сечения элемента.

Модуль упругости представляет собой меру жесткости материала. Материалы с высокой энергией межатомных связей (они плавятся при высокой температуре) характеризуются и большим модулем упругости (табл. 1).

Механические свойства материала характеризуются диаграммой деформаций, построенной на основании результатов испытания в координатах «напряжение – относительная деформация» ($\sigma - \varepsilon$).

Таблица 1

Зависимости модуля упругости E от температуры плавления $t_{пл}$ материала

Материал	$E \cdot 10^{-4}$, Мпа	$t_{пл}$, °C	Материал	$E \cdot 10^{-4}$, Мпа	$t_{пл}$, °C
Карбид кремния	35,5	2800	Алюминий	7,0	660
Периклаз	24,6	2800	Свинец	1,5	327
Корунд	37,2	2050	Полистирол	0,3	300
Железо	21,1	1539	Каучук	0,007	300
Медь	11,2	1083			

Модуль упругости определяет тангенс угла наклона производной $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ к оси деформаций. На рис. 10 представлены кривые $\sigma - \varepsilon$ для строительных материалов пластичных, хрупких и эластомеров.

Поликристаллические изотопные материалы (металлы, кристаллические полимеры и др.) сохраняют упругость при значительных напряжениях; для многих из них характерно пластическое разрушение, отмеченное площадкой текучести на диаграмме $\sigma - \varepsilon$ (рис. 1.2. *а*). При хрупком же разрушении пластические деформации невелики (рис. 1.2. *б*).

Нелинейное соотношение между напряжением и деформацией у некоторых материалов проявляется при относительно невысоких напряжениях. Так, у материалов с конгломератным строением (бетонов различного вида) оно отчетливо наблюдается уже при напряжениях, больших 0,2 предела прочности.

Упругая деформация эластомеров (каучуков) может превышать 100%. Первоначально для распрямления цепей молекул эластомера требуется низкое напряжение. По мере распрямления цепей молекул сопротивление дальнейшему деформированию возрастает, так как увеличение деформаций вызывает разрыв связей уже выпрямленных молекул (рис. 1.2. *в*).

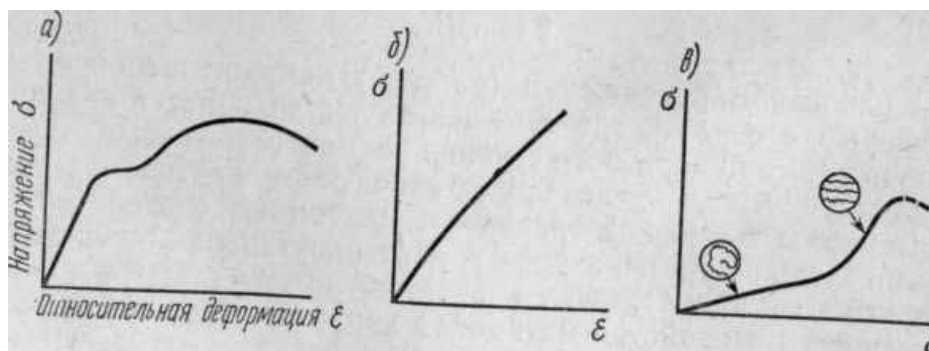


Рис. 1.2. Схемы диаграмм деформаций:

а – стали; б – бетона; в – эластомера

Таким образом, диаграммы деформаций позволяют определить модуль упругости и установить его изменение в зависимости от уровня напряженного состояния.

Модуль упругости E связан с другими упругими характеристиками материала посредством коэффициента Пуассона. Одноосное растяжение (сжатие) σ_z вызовет деформацию по этой оси $+\varepsilon_z$ и сжатие по боковым направлениям $-\varepsilon_x$ и $-\varepsilon_y$, которые у изотропного материала равны между собой.

Коэффициент Пуассона, или коэффициент поперечного сжатия, μ равен отношению:

$$\mu = -\varepsilon_x / \varepsilon_z$$

Если бы объем материала при одноосном упругом нагружении оставался постоянным, то наибольшее теоретическое значение $\mu = 0,5$. Силы притяжения и отталкивания в материале различным образом зависят от изменения межатомного расстояния, поэтому значения коэффициента Пуассона реальных материалов сильно отличаются от теоретического и различаются между собой: у бетона $-0,17-0,2$, полиэтилена $-0,4$.

Объемный модуль упругости, или модуль всестороннего сжатия (растяжения), K связан с модулем Юнга следующим соотношением:

$$K = E / [3(1 - 2\mu)]$$

Модуль сдвига связан с модулем Юнга посредством коэффициента Пуассона

$$G = E / [2(1 + \mu)]$$

Поскольку $\mu = 0,2-0,3$, G составляет 35–42% от E . Используя приведенную выше формулу для K , получим

$$G = 3K(1 - 2\mu) / [2(1 + \mu)]$$

Экспериментально определив модуль Юнга и коэффициент Пуассона, можно вычислить модуль сдвига и объемный модуль упругости, пользуясь приведенными формулами (вывод этих формул дается в курсе сопротивления материалов).

Прочность – свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, вызванных внешними силами или другими факторами (стесненная усадка, неравномерное нагревание и т.п.).

Прочность материала оценивают *пределом прочности* (временным сопротивлением) R , определенным при данном виде деформации. Для хрупких материалов (природных каменных материалов, бетонов, строительных растворов, кирпича и др.) основной прочностной характеристикой является *предел прочности при сжатии*. Поскольку строительные материалы неоднородны, то предел прочности определяют как средний результат

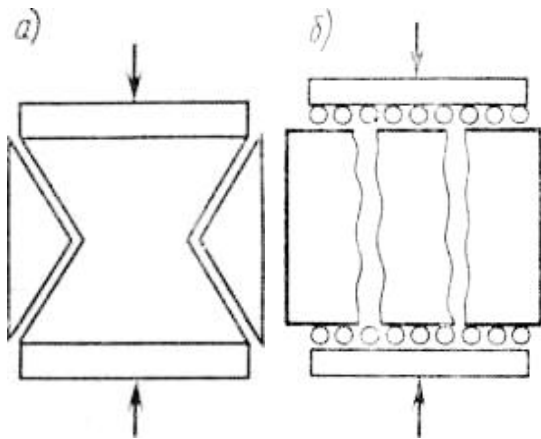


Рис. 1.3. Схемы разрушения хрупких материалов при:

а – сжатии; б – то же со смазанными опорными гранями

испытания серии образцов (обычно не менее трех образцов). Форма и размеры образцов, состояние их опорных поверхностей, существенно влияют на результаты испытания. Например, у кубиков малых размеров предел прочности при сжатии оказывается выше, чем у кубиков больших размеров из того же материала.

Призмы показывают меньшее сопротивление сжатию, чем кубы одинакового поперечного сечения. Это объясняется тем, что при сжатии образца возникает его поперечное расширение. Силы трения, возникающие между опорными гранями образца и плитами пресса, удерживают части образца, прилегающие к плитам, от поперечного расширения и, следовательно, от разрушения. Средние же части образца, испытывая поперечное расширение,

разрушаются в первую очередь. Поэтому при испытании кубов из хрупких материалов (бетона, раствора, камня и др.) получается характерная форма разрушения: образуются две усеченные пирамидки, сложенные вершинами (рис. 1.3.). Если же хорошо смазать опорные грани куба (например, парафином) и тем самым уменьшить силы трения, то под нагрузкой куб вследствие свободного поперечного расширения распадается на ряд слоев, разделенных вертикальными трещинами. При смазке прочность куба при сжатии составляет лишь около 50 % прочности того же образца с не смазанными опорными поверхностями.

На результаты испытания влияет скорость нагружения образца. Если нагрузка возрастает быстрее, чем установлено стандартом, то результат испытания получается завышенным, так как не успевают развиваться пластические деформации.

На результаты испытания влияет скорость нагружения образца. Если нагрузка возрастает быстрее, чем установлено стандартом, то результат испытания получается завышенным, так как не успевают развиваться пластические деформации.

Приведенные примеры говорят о том, что показатели прочности строительного материала, используемые в качестве характеристик его качества, являются условными величинами, получаемыми по стандартным методикам, единым для всей страны.

В зависимости от прочности строительные материалы разделяются на марки. Марка материала по прочности является важнейшим показателем его качества. В нормативных документах марка указывается в кгс/см²; например, марки портландцемента М400, М500, М550 и М600. Чем выше марка, тем выше качество конструкционного строительного материала. Единая шкала марок охватывает все строительные материалы.

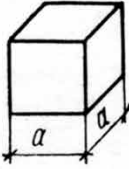
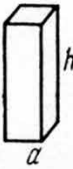
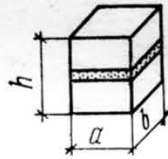
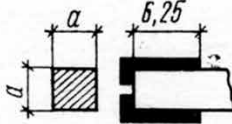
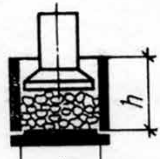
Предел прочности при осевом сжатии $R_{сж}$ (МПа) равен частному от деления разрушающей силы $P_{разр}$ на первоначальную площадь поперечного сечения образца (куба, цилиндра, призмы):

$$R_{сж} = P_{разр} / F$$

В табл. 2 систематизированы характерные образцы, применяемые для определения предела прочности строительных материалов при сжатии.

Таблица 2

Схема стандартных методов определения прочности при сжатии

Образец	Эскиз	Расчетная формула	Материал	Размер стандартного образца, см
Куб		$R = \frac{P}{a^2}$	Бетон Раствор Природный камень	15×15×15 7,07×7,07×7,07 5×5×5; 10×10×10; 15×15×15; 20×20×20
Цилиндр		$R = \frac{4P}{\pi d^2}$	Бетон Природный камень	$d = 15; h = 30$ $d = h = 5; 7; 10; 15$
Призма		$R_{пр} = \frac{P}{a^2}$	Бетон Древесина	$a = 10; 15; 20;$ $h = 40; 60; 80$ $a = 2; h = 3$
Составной образец		$R = \frac{P}{S}$	Кирпич	$a = 12; b = 12,3; h = 14$
Половина образца-призмы, изготовленной из цементно-песчаного раствора		$R = \frac{P}{S}$	Цемент	$a = 4;$ $S = 25 \text{ см}^2$
Проба щебня (гравия) в цилиндре		$R_p = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100$	Крупный заполнитель для бетона	$d = 15; h = 15$

Предел прочности при осевом растяжении R_p (МПа) используется в качестве прочностной характеристики стали, бетона, волокнистых и других материалов (табл. 3). В зависимости от соотношения $R_p / R_{сж}$ можно условно разделить материалы на три группы:

материалы, у которых $R_p > R_{сж}$ (волокнистые древесины и др.);

$R_p \approx R_{сж}$ (сталь);

$R_p < R_{сж}$ (хрупкие материалы – природные камни, бетон, кирпич).

Предел прочности при изгибе $R_{п.и}$ (МПа) определяют путем испытания образца материала в виде балочек на двух опорах. Их нагружают одной или двумя сосредоточенными силами до разрушения. Предел прочности условно вычисляют по той же формуле сопротивления материалов, что и напряжение при изгибе:

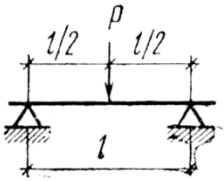
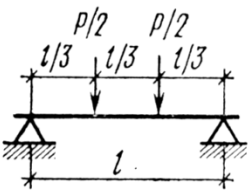
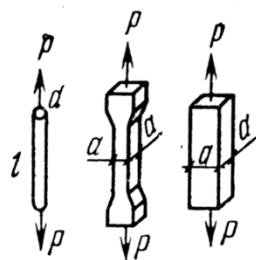
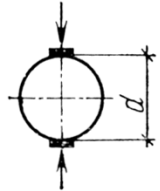
$$R_{p-u} = M / W$$

где M – изгибающий момент, W – момент сопротивления.

В табл. 3 приведены схемы испытания и соответствующие им расчетные формулы.

Таблица 3

Схема стандартных методов определения прочности при изгибе и растяжении

Образец	Схема испытаний	Расчетная формула	Материал	Размер стандартного образца
<i>Испытание на изгиб</i>				
Призма, кирпич в натуре		$R_{и} = \frac{3 Pl}{2 bh^2}$	Цемент Кирпич	$4 \times 4 \times 16$ $12 \times 6,5 \times 25$
Призма		$R_{p.и} = \frac{Pl}{bh^2}$	Бетон Древесина	$15 \times 15 \times 60$ $2 \times 2 \times 30$
<i>Испытание на растяжение</i>				
Стержень, восьмерка, призма		$R_p = \frac{4 P}{\pi d^2}$ $R_p = \frac{P}{a^2}$	Бетон Сталь	$5 \times 5 \times 50$; $10 \times 10 \times 80$ $a_0 = 1$; $l_0 = 5$; $l \geq 10$
Цилиндр		$R_{p.p} = \frac{2P}{\pi dl}$	Бетон	15×15

Эти формулы, строго говоря, справедливы в пределах упругой работы материала и при одинаковом его сопротивлении сжатию и растяжению. Эти условия не выполняются в стадии разрушения материала. При испытании на изгиб кирпича, бетонных балочек разрушение начинается в нижней растянутой зоне, так как эти материалы имеют значительно меньшую прочность при растяжении, чем при сжатии. Поэтому по формулам вычисляют условное

значение предела прочности при изгибе, являющееся стандартной прочностной характеристикой кирпича, строительного гипса, цемента, дорожного бетона.

Динамической (или ударной) прочностью называют свойство материала сопротивляться разрушению при ударных нагрузках. Она характеризуется количеством работы, затраченной на разрушение стандартного образца, отнесенной к единице объема (Дж/см³) или площади поперечного сечения образца (Дж/м²). Сопротивление удару важно для материалов, используемых при устройстве фундаментов машин, полов промышленных зданий, дорожных покрытий и т. п.

Коэффициент конструктивного качества (к. к. к.) материала равен отношению показателя прочности R (МПа) к относительной объемной массе γ (безразмерная величина):

$$\text{к. к. к.} = R / \gamma.$$

Следовательно, это прочность, отнесенная к единице объемной массы. Лучшие конструкционные материалы имеют высокую прочность при малой собственной объемной массе.

Для некоторых материалов значения к. к. к. (R/γ) приведены ниже: для стеклопластика – $450 : 2 = 225$ МПа, древесины (без пороков) – $100 : 0,5 = 200$ МПа, стали высокопрочной – $1000 : 7,85 = 127$ МПа, стали – $390 : 7,85 = 5$ МПа.

Для каменных материалов значения к. к. к. ($R_{сж} / \gamma$) составляют: для легкого конструкционного бетона – $40 : 1,8 = 22,2$ МПа, тяжелого бетона – $40 : 2,4 = 16,6$ МПа, легкого бетона – $10 : 0,8 = 12,5$ МПа, кирпича – $10 : 1,8 = 5,56$ МПа.

Повышения к. к. к. можно добиться снижением объемной массы материала или увеличением его прочности.

Теоретическая прочность однородного материала характеризуется напряжением, необходимым для разделения двух примыкающих друг к другу слоев атомов. Теоретическую прочность $\sigma_{теор}$ получают из условия, что в момент разрушения вся энергия упругой деформации, накопленная в объеме между двумя слоями атомов, переходит в поверхностную энергию двух вновь образовавшихся при разрушении поверхностей. Согласно уравнению Орована-Келли:

$$\sigma_{теор} = \sqrt{E\mathcal{E} / a}$$

где E – модуль упругости; $\mathcal{E}$ – поверхностная энергия твердого тела на 1 см²; a – межатомное расстояние (в среднем $2 \cdot 10^{-8}$ см).

Следовательно, теоретическая прочность материала тем выше, чем больше его модуль упругости и поверхностная энергия и чем меньше межатомное расстояние.

Согласно приведенному выражению прочность твердого тела должна находиться между значениями $E / 5$ и $E / 10$. Например, теоретическая прочность стали 30000 МПа, в то время как прочность обычной стали около 400 МПа, а специальной проволоки – 3000 МПа. Теоретическая прочность стекла при комнатной температуре 14000 МПа, прочность на растяжение тонких стеклянных волокон (толщиной 3–5 мкм) – 3500–5000 МПа, а обыкновенного стекла только 70–150 МПа. Следовательно, используется сравнительно небольшая доля потенциальной прочности материала; прочность понижается благодаря наличию пор, трещин и дефектов структуры материала.

1.1.2. Прочностные свойства

Прочность – свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, вызванных внешними силами или другими факторами (стесненной усадкой).

Прочность материала оценивают пределом прочности (временным сопротивлением) R , определенным при данном виде деформации. Для хрупких материалов (бетонов, кирпича и др.) основной прочностной характеристикой является предел прочности при сжатии.

У кубиков малых размеров предел прочности при сжатии оказывается выше, чем у кубиков больших размеров из того же материала.

Призмы показывают меньшее сопротивление сжатию, чем кубы одинакового поперечного сечения. Это объясняется тем, что при сжатии образца возникает его поперечное расширение.

В зависимости от прочности строительные материалы подразделяются на марки. Марка материала по прочности является важнейшим показателем его качества. В нормативных документах марка указывается в МПа. Портландцемент 400, 500, 550, 600.

Предел прочности при осевом сжатии ($R_{сж}$, МПа), равен частному от деления разрушающей силы $R_{разр}$ на первоначальную площадь поперечного сечения образца:

$$R_{сж} = R_{разр}/F$$

Предел прочности при осевом растяжении R_p (МПа) используется в качестве прочностной характеристики стали, бетона. В зависимости от соотношения R_p и $R_{сж}$ можно разделить на три группы:

1. $R_p > R_{сж}$ (волокнистые, дерево).
2. $R_p = R_{сж}$ – (сталь и др.).
3. $R_p < R_{сж}$ (бетон, кирпич).

Предел прочности при изгибе $R_{пу}$ (МПа) определяют путем испытания образца материала в виде призм (балочек) на двух опорах. Их нагружают сосредоточенными силами. Предел прочности вычисляют:

$$R_{пу} = M/W,$$

где M – изгибающий момент, W – момент сопротивления.

Теоретическая прочность однородного материала характеризуется напряжением, необходимым для разделения двух примыкающих один к другому слоев атомов.

Теоретическую прочность $R_{теор}$ получают из условия, что в момент разрушения вся энергия упругой деформации, накопленная в объеме между двумя слоями атомов, переходит в поверхностную энергию двух вновь образовавшихся при разрушении поверхностей. Согласно уравнению Орована-Келли

$$\sigma_{теор} = E\gamma/a.$$

где E – модуль упругости, γ – поверхностная энергия твердого тела на 1 см²; a – межатомное расстояние.

Широко используются методы, которые позволяют испытывать образцы без разрушения:

- импульсный ультразвуковой,
- резонансный,
- поверхностной твердости (механические методы)

1.1.3. Влияние строения материала на его прочность

Прочность материала одного и того же состава зависит от его пористости. Так, для бетона увеличение пористости от 12.4 до 15.2% снизило его прочность при сжатии с 37.5 до 26 МПа.

Различают хрупкое и пластическое разрушения твердых тел.

Хрупкое разрушение сопровождается малой предшествующей пластической деформацией.

Разрушению пластических материалов предшествуют изменение формы и большая деформация.

Твердость – свойство материала сопротивляться местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела. Твердость минералов оценивают шкалой Мосса, представленной десятью минералами, из которых каждый последующий

своим острым концом царапает все предыдущие Эта шкала включает минералы в порядке возрастающей твердости от 1 до 10:

1. Тальк $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – легко царапается ногтем.
2. Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – царапается ногтем
3. Кальцит CaCO_3 – царапается стальным ножом.
4. Флюорит (плавиковый шпат) CaF_2 – царапается стальным ножом
5. Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$ – нож под сильным давлением.
6. Ортоклаз $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ – царапает стекло.
7. Кварц SiO_2 – легко царапает стекло
8. Топаз $\text{Al}_2[\text{SiO}_4] \cdot (\text{F}, \text{OH})$ – легко царапает стекло.
9. Корунд Al_2O_3 } применяются в качестве
10. Алмаз C } абразивных материалов

Истираемость оценивают потерей первоначальной массы образца материала, отнесенной к площади поверхности истирания F , и вычисляют по формуле:

$$U = (m_1 - m_2) / F, \text{ г/см}^2$$

m_1, m_2 – масса образца до истирания и после.

На рис. 1.4. представлен график прочности цементного бетона, показывающий, что увеличение пористости с 12,4 до 15,2% снизило прочность при сжатии с 37,5 до 26 МПа. Подобная зависимость характерна и для других материалов (известняка керамических материалов и пр.).

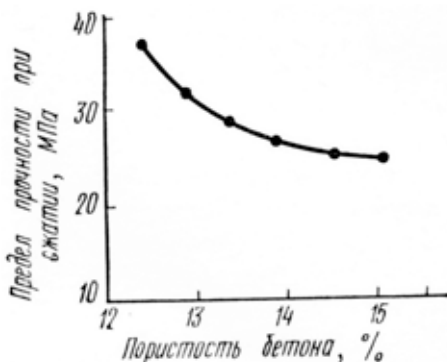


Рис. 1.4. Кривая зависимости прочности цементного бетона от пористости

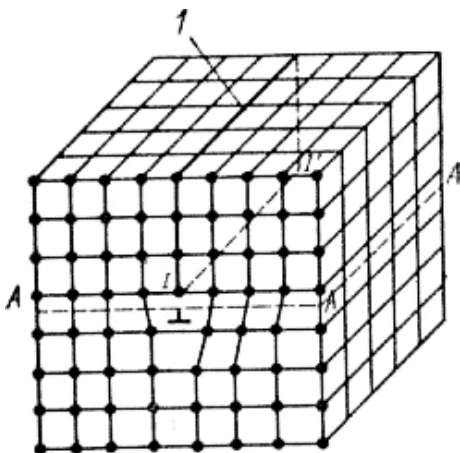


Рис. 1.5. Краевая дислокация в кристаллической решетке:
1 – экстраплоскость

Реальные кристаллические материалы имеют большее или меньшее количество точечных дефектов. Одни из них заключаются в том, что некоторые атомы или ионы смещены в другие положения и могут располагаться даже между узлами кристаллической решетки (дефекты Френкеля). Их нормальные места остаются свободными и затем замещаются другими ионами. Следовательно, в узлах решетки могут быть свободные места (вакансии). Другого рода дефекты возникнут в результате размещения посторонних атомов или ионов примеси в узлах решетки, где они заменяют основное вещество (примеси замещения), или между ними (примеси внедрения).

Свойства кристаллических материалов зависят от дислокаций кристаллов.

Дислокация – это всегда одномерный (линейный) дефект кристаллической решетки, возникающий или в процессе образования кристалла, или в результате последующих механических, тепловых и других воздействий. Дислокации бывают краевые, винтовые и смешанные – криволинейные.

На рис. 1.5 схематически изображена краевая дислокация. Отклонение от идеального строения кристалла вызвано тем, что один слой атомов (он расположен на рисунке в экстраплоскости) по каким-то причинам оказался незавершенным. Кромка 1 – 1' «лишнего» слоя атомов образует линейный дефект называемый краевой дислокацией (она обозначена на рис. 13 знаком $\perp$). По обе стороны от кромки экстраплоскости атомы сдвинуты на

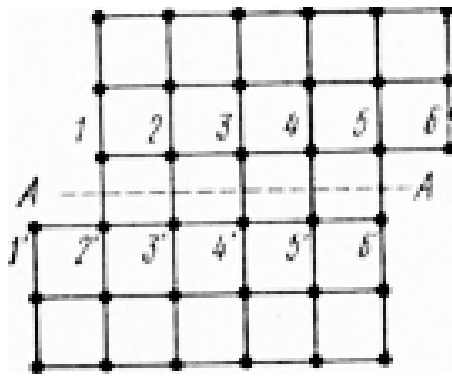


Рис. 1.6. Схема пластического сдвига путем движения дислокации (по П. И. Полухину)

угол, соответствующий теоретической прочности кристалла на сдвиг. Стоит приложить внешнее усилие, значительно меньшее теоретической прочности данного кристалла, чтобы осуществить сдвиг на одно межатомное расстояние в плоскости $A-A'$, нормальной к экстраплоскости (рис. 1.6.).

Продолжая нагружать кристалл, перемещаем дислокацию из одного ряда атомов в другой, пока не вытолкнем дислокацию на грань кристалла. Механизм скольжения, основанный на движении дислокаций, может быть сопоставлен с перемещением по полу ковра с предварительно созданной складкой (рис. 1.7.).

При таком способе требуется значительно меньшее усилие, чем в случае перемещения ковra как единого целого. Дислокационная теория рассматривает пластический сдвиг в кристаллических материалах как скольжение путем движения дислокаций. Подвижность дислокации зависит от того, насколько легко межатомная связь может быть разрушена и вновь восстановлена; ведь каждый раз, когда дислокация перемещается на один шаг (межатомное расстояние), должны рваться старые связи и устанавливаться новые. В этом отношении предпочтительнее связи, обеспечивающие одинаковое притяжение предпочтительнее связи, обеспечивающие одинаковое притяжение во всех направлениях: металлическая и ионная. Дислокации в ковалентных кристаллах при нормальной температуре малоподвижны, так как ковалентная связь является направленной, наиболее прочной и жесткой.

Дислокации присутствуют почти во всех кристаллических материалах. Они значительно понижают прочность монокристаллов, но зато придают пластичность поликристаллическим телам с металлической связью, делают металл ковким, затрудняют распространение трещин. По данным Ван Флека, теоретическая прочность железа на сдвиг около 7000 МПа, но практически кристалл очень чистого железа сдвигается при напряжении, меньшем в 1000 раз, – около 7 МПа; для рядовых сталей (по Гордону) прочность на сдвиг 150–250 МПа, для высокопрочных 1500 МПа. Доказательством, подтверждающим объяснение низкой прочности кристаллов движением дислокаций, являются результаты изучения механических свойств «усов». Эти нитевидные кристаллы различных материалов, выращенные без краевых дислокаций, способны претерпевать упругую деформацию до 5–6 % без признаков пластического течения. Бездислокационные «усы» способны выдержать напряжения сдвига, достигающие 5 % от модуля сдвига; это на несколько порядков больше, чем у обычных кристаллов. В реальности дислокаций убеждают и непосредственные наблюдения. Те места, где дислокации выходят на поверхность, выявляются с помощью химического травления в виде серий «оспинок» – ямок травления. Снят кинофильм о движении дислокаций.

Плотность дислокаций (т.е. число дислокаций, пересекающих площадь в 1 см^2) может быть весьма велика – до 10^7 – 10^8 (в отожженных металлах). При механических воздействиях дислокации перемещаются, взаимодействуют между собой и порождают новые дислокации, в особенности в местах концентрации напряжений. В результате этого их плотность возрастает до 10^{10} – 10^{13} (в сильно наклепанных металлах). Когда дислокаций много (больше некоторой критической плотности), они переплетаются (словно спутанные нитки), тормозят перемещение друг друга, в результате материал упрочняется. Однако при дальнейшем деформировании материал может сделаться хрупким.

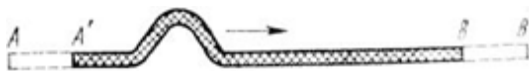


Рис. 1.7. Складка ковra в качестве модели скольжения

Вакансии в кристаллической решетке, межузельные (внедренные) атомы, дислокации играют важную роль в процессах диффузии, повышают

химическую активность, что используется, в частности, в технологии быстротвердеющих цементов. Однако наличие дислокаций и дефектов структуры в готовом материале снижает его стойкость, так как деформированные межатомные связи (как и места концентрации напряжений) более уязвимы для химических и, физических воздействий среды. Следовательно, дислокации следует рассматривать как структурный фактор, регулирующий комплекс наиболее важных свойств кристаллических материалов.

1.1.4. Реологические модели

Реология – наука о деформациях и текучести вещества, исследующая различные деформации материалов в зависимости от напряжений.

Механические свойства:

- упругость
- пластичность
- вязкость.

Моделью упругого материала, подчиняющегося закону Гука, служит спиральная пружина:

$$E = \sigma / \varepsilon, \text{ Па.}$$

Модель пластического тела Сен-Венана представляет собой груз, покоящийся на столе. Груз может перемещаться, когда напряжение достигнет предела текучести σ_T .

Идеальная (Ньютоновская) жидкость подчиняется уравнению вязкого течения:

$$\varepsilon_{\text{вязк}} = \sigma t / \eta$$

где σ – напряжение сдвига, Па; t – время, с; η – вязкость, Па с.

$$\sigma (\sigma - \sigma_T) t$$

$$\text{Общая деформация} - \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_T) t}{\eta}$$

$$\text{Напряжение} - \sigma = \sigma_T + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

таким образом, модель Шведова-Бингама характеризуется тремя реологическими параметрами: E , σ_T , η используется для получения паст, глин, красок.

В соответствии с законом Гука и приведенной выше формулой для $\varepsilon_{\text{вязк}}$ получаем следующее уравнение упруго-вязкой деформации: $\Sigma = \sigma / E + \sigma_T /$

$$\Sigma = \sigma (1/E + t/\eta)$$

Механическое разрушение

Различают хрупкое и пластическое разрушение твердых тел. Хрупкое разрушение сопровождается малой предшествующей пластической деформацией, поэтому хрупкость определяют, как свойство материала разрушаться «внезапно», не претерпевая существенной деформации. Хрупкость присуща не только кристаллическим, но и стеклообразным и даже полимерным материалам.

Разрушению пластичных (вязких) материалов предшествует изменение формы и большая деформация.

Большинство материалов при понижении температуры охрупчиваются, у них происходит переход от пластического разрушения к хрупкому. Так ведут себя битумные материалы, некоторые полимеры, металлы и др.

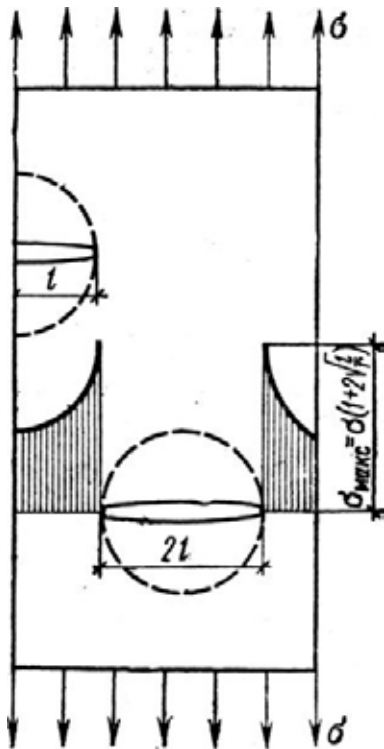


Рис. 1.8. Концентрация напряжений в пластине с трещиной (по Ван Флексу):

1 – концентрация напряжений

Хрупкое разрушение происходит в результате образования и быстрого роста одной или нескольких трещин при возрастающей нагрузке.

Трещина (как и надрез) вызывает концентрацию напряжений около ее вершины (рис. 1.8). В этом месте напряжение оказывается значительно большим, чем можно ожидать из простого уменьшения площади поперечного сечения.

Напряжение σ_k на конце трещины зависит от номинального напряжения σ_n , длины (глубины) трещины l и радиуса кривизны в вершине трещины r :

$$\sigma_k = \sigma_n \left(1 + 2\sqrt{l/r}\right)$$

Коэффициент концентрации напряжений $\sigma_k / \sigma_n = 1 + 2\sqrt{l/r}$ может быть равен 100 и даже 1000, если радиус вершины трещины соизмерим с радиусом атома, хотя глубина трещины лишь 0,1 и 10 мкм. Следовательно, местное напряжение может превысить 7000 МПа при номинальном (т.е. среднем по сечению) напряжении 35–100 МПа. Трещина как бы разрезает атомные цепочки, и значительная часть нагрузки, которую несли разрезанные атомные цепочки, приходится теперь на атомную связь у конца трещины. Перегруженная связь лопнет раньше других и положение ухудшится, так как следующее звено будет еще больше перегружено. Таким образом, трещина становится (по словам Гордона) тем инструментом, с помощью которого приложенная извне слабая сила рвет прочные межатомные связи.

При распространении трещины материал вблизи трещины разгружается, и вследствие этого выделяется энергия упругой деформации. Объем, в котором выделяется энергия, изображается на рис. 16 как половина объема цилиндра единичной высоты, численно равного $\pi l^2/2$. Выделенная энергия U_d зависит от приложенного напряжения σ , модуля упругости E и глубины трещины l (половина длины внутренней трещины):

$$U_d = -\frac{\pi l^2}{2E} \sigma^2$$

Образование двух новых поверхностей требует затрат энергии

$$U_n = 2\mathcal{E}_1 l$$

где $\mathcal{E}_1$ – поверхностная энергия единицы площади поверхности.

Трещина будет самопроизвольно расти, если длина трещины превышает некоторую «критическую длину Гриффитса», при которой освобождающаяся энергия упругой деформации больше энергии образующихся новых поверхностей, тогда

$$\frac{\pi l \sigma^2}{E} = 2\mathcal{E}_1$$

откуда

$$\sigma = (2\mathcal{E}_1 E / \pi l)^{1/2}$$

Напряжение, необходимое для разрушения растянутой пластины, возрастает у материалов с высоким модулем упругости и большей поверхностной энергией, оно уменьшается при наличии более глубоких поверхностных трещин.

В данном материале для каждого напряжения существует своя критическая длина трещин. Трещины, глубина которых превышает $l_{кр}$, способны при данном σ самопроизвольно расти со скоростью, приближающейся к скорости распространения упругой волны (1,5–2 км/с).

Сжимающие усилия, в отличие от растягивающих могут передаваться через трещины, не вызывая концентрации напряжений. Поэтому хрупкие материалы всегда оказываются значительно прочнее при сжатии, чем при растяжении.

Торможение трещин при помощи создаваемых в материале внутренних поверхностей раздела используется в современных композиционных материалах.

Механизм торможения трещины по Куку-Гордону основан на том, что при распространении трещины кроме напряжений, перпендикулярных трещине, достигающих максимума в ее вершине, возникает растяжение в направлении, параллельном трещине. Растягивающее напряжение, параллельное трещине, равно нулю в вершине трещины и достигает максимума впереди трещины на расстоянии одного-двухатомных размеров от ее вершины. В растянутом материале отношение максимального напряжения, параллельного трещине, к максимальному напряжению, направленному перпендикулярно ее поверхности, равно приблизительно 1/5. Если прочность сцепления на поверхности раздела больше 1/5 прочности материала, то поверхность не разрушится, трещина ее только пересечет и поведение материала не изменится, т.е. он останется хрупким. Если же прочность сцепления меньше 1/5 прочности на растяжение самого материала, то прежде чем трещина достигнет поверхности раздела, последняя будет разрушена на небольшом участке, и образуется ловушка, способная остановить трещину (рис. 1.9).

Кончик трещины, который был очень малым, при встрече с поверхностью раздела становится очень большим, устраняется концентрация напряжений в вершине трещины и тенденция к ее распространению (рис. 1.10).

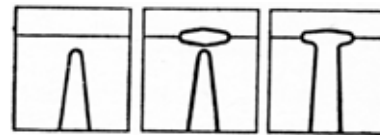


Рис. 1.9. Схема торможения трещин (по Куку-Гордону)

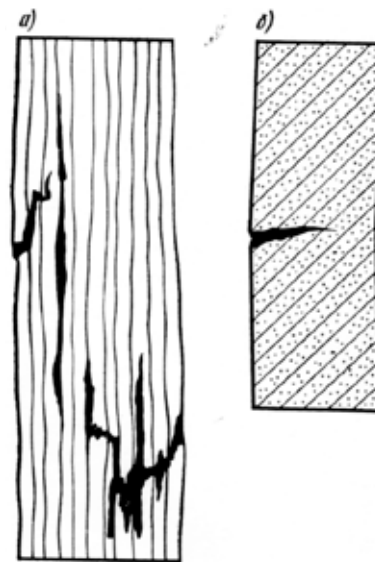


Рис. 1.10. Влияние внутренних поверхностей на торможение развития трещин:

а – волокнистый материал, содержащий внутренние поверхности, б – однородный материал (по Гордону)

Твердость, истираемость и износ

Твердостью называют свойство материала сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела. Твердость минералов оценивают шкалой Мооса, представленной десятью минералами, из которых каждый последующий своим острым концом царапает все предыдущие. Эта шкала включает минералы в порядке возрастающей твердости от 1 до 10:

Тальк $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$ – легко царапается ногтем.

Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – царапается ногтем.

Кальцит CaCO_3 – легко царапается стальным ножом.

Флюорит (плавиковый шпат) CaF_2 – царапается стальным ножом под небольшим нажимом.

Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$ – царапается ножом под сильным нажимом.

Ортоклаз $K[AlSi_3O_8]$ Кварц SiO_2 Топаз $Al_2[SiO_4](F, OH)_2$ Корунд Al_2O_3

Алмаз C

Легко царапают стекло, применяются в качестве абразивных (истирающих и шлифующих) материалов.

Твердость древесины, металлов, бетона и некоторых других строительных материалов определяют, вдавливая в них стальной шарик или твердый наконечник (в виде конуса или пирамиды). В результате испытания вычисляют число твердости $HB = P / F$, где F – площадь поверхности отпечатка.

От твердости материалов зависит их истираемость: чем выше твердость, тем меньше истираемость.

Истираемость оценивают потерей первоначальной массы образца материала, отнесенной к площади поверхности истирания F и вычисляют по формуле (г/см²)

$$I = (m_1 - m_2) / F$$

где m_1 и m_2 – масса образца до и после истирания.

Соппротивление материала истиранию определяют, пользуясь стандартными методами: кругом истирания и абразивами (кварцевыми песком или наждаком). Это свойство важно для эксплуатации дорог, полов, ступеней лестниц и т. п.

Износом называют свойство материала сопротивляться одновременному воздействию истирания и ударов. Износ определяют на образцах материалов, которые испытывают во вращающемся барабане со стальными шарами или без них. Показателем износа служит потеря массы пробы материала в результате проведенного испытания (в % от первоначальной массы).

Модели механических свойств строительных материалов

Для моделирования поведения упругого материала используют пружину. Упругая деформация идеального подчиняющегося закону Гука твердого тела возникает тотчас после приложения силы и не зависит от времени, как это показано на рис. 1.11. После снятия нагрузки деформация становится равной нулю, следовательно, деформация упругого твердого тела постоянна и обратима.

Идеальная (ньютоновская) жидкость подчиняется уравнению вязкого течения

$$\varepsilon_{\text{вязк}} = \tau t / \eta$$

где τ – напряжение сдвига, Па; t – время, с; η – вязкость, Па · с.

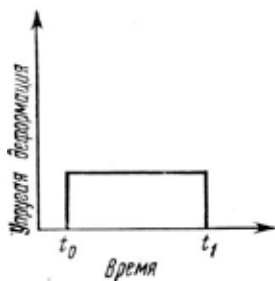


Рис. 1.11. Модель идеального (подчиняющегося закону Гука) твердого тела:

а – график упругой деформации;
б – модель-пружина



Деформация вязкого течения $\varepsilon_{\text{вязк}}$ при постоянном напряжении сдвига возрастает пропорционально времени (рис. 1.12, а). Поведение жидкости моделируют демпфером (рис. 1.12, б), в котором поршень перемещается под действием приложенных сил, при этом жидкость протекает через кольцевой зазор между стенками цилиндра и поршнем.

Поведение материалов, сочетающих упругие и вязкие свойства, можно описать с помощью модели Максвелла, состоящей из пружины и демпфера, соединенных последовательно (рис. 1.13, б), при постоянном напряжении. В первый момент времени t_0 сопротивление создается упругим элементом и возникает упругая деформация $\varepsilon_{\text{упр}}$, сохраняющаяся неизменной при постоянном напряжении. В период времени от t_0 до t_1 дефор-

мация возрастает вследствие вязкого течения (оно моделируется демпфером, присоединенном к пружине). В момент времени t_1 при снятии нагрузки упругая составляющая деформации равна нулю, но вязкое смещение $\varepsilon_{\text{вязк}}$ сохраняется, так как оно необратимо. Следовательно, общая деформация ε асфальтобетона, пластика и т.д. содержит упругую и вязкую составляющую:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{вязк}}$$

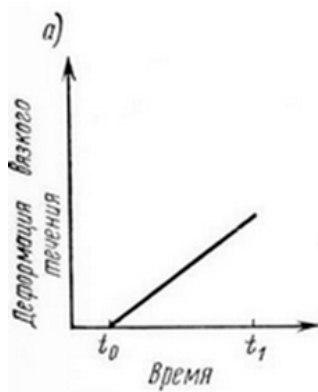


Рис. 1.12. Модель идеальной (ньютоновской) жидкости: а — график деформации вязкого течения; б — модель-демпфер

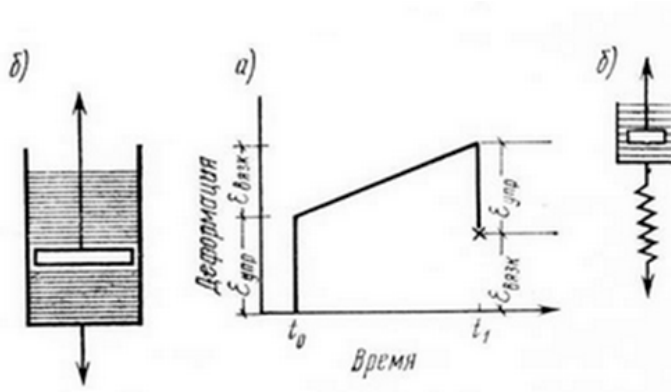


Рис. 1.13. Сочетание упругих и вязких свойств: а — график упругих деформаций; б — упругий и вязкий элементы расположены последовательно (модель Максвелла)

В соответствии с законом Гука и приведенной выше формулой для $\varepsilon_{\text{вязк}}$ получаем следующее уравнение упруговязкой деформации:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \sigma t / \eta$$

$$\varepsilon = \sigma (1 / E + t / \eta)$$

Соответствующий график приведен на рис. 1.13, а. Примером вязкого течения является след шин, вдавившихся в асфальтовое покрытие дороги. Он напоминает о повышенной склонности к вязкому течению материала покрытия в жаркую погоду. При высокой температуре вязкое течение проявляется у стекла, металла и других твердых материалов.

Релаксация напряжений

Модели деформации твердых тел дают возможность получить количественную характеристику скорости релаксационных явлений, протекающих в полимерных и других строительных материалах. Если быстро деформировать тело (например, полимер), сохраняя деформацию постоянной, то напряжение постепенно уменьшается. Деформация вызывает перестройку внутренней структуры тела, и требуется некоторый промежуток времени, пока все частицы тела придут в равновесие в соответствии с новыми условиями.

Элементарная модель релаксации напряжений при постоянной деформации представляет собой последовательное соединение пружины и демпфера (модель Максвелла). Для этой модели общая деформация ε равна сумме упругой и вязкой составляющих (рис. 1.13)

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{вязк}} = \text{const}$$

Следовательно, $\frac{d\varepsilon_{\text{упр}}}{dt} = -\frac{d\varepsilon_{\text{вязк}}}{dt}$.

Поскольку $\varepsilon_{\text{упр}} = \sigma / E$, а $\varepsilon_{\text{вязк}} = -\sigma t / \eta$,

получим $\frac{d\sigma}{dt} \frac{1}{E} = -\sigma / \eta$,

откуда $\frac{d\sigma}{\sigma} = -(E / \eta) dt$.



Рис. 1.14. Релаксация напряжений при постоянной деформации

Введем постоянную времени релаксации $\lambda = \eta / E$, тогда $\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$ где σ_0 — первоначальное напряжение. Из формулы видно, что релаксация напряжения следует экспоненциальному закону (рис. 1.14). Скорость релаксации напряжения характеризуется временем релаксации — промежутком времени, в течение которого напряжение уменьшается в e раз по сравнению с первоначальным (где e — основание натуральных логарифмов).

Пример (по Ван Флеку). Для увеличения длины каучуковой ленты с 10 до 140 мм необходимо приложить напряжение 8,44 МПа. После выдержки ленты в этом положении в течение 42 суток напряжение снизилось до 4,22 МПа.

Определить: 1) постоянную времени релаксации; 2) действующее напряжение после выдержки в течение 90 суток.

Решени.

1) Согласно уравнению релаксации напряжений

$$\frac{\ln \sigma}{\sigma_0} = -t / \lambda ;$$

$\ln[4,22 / 8,44] = -42 / \lambda$, откуда $\lambda = 61$ сут.

2) $\sigma_{90} = 8,44 e^{-90/61} = 1,92$ МПа.

Другое решение п. 2 с учетом 48 дополнительных суток:

$$\sigma_{+48} = 4,22 e^{-48/61} = 1,92 \text{ МПа}$$

1.2. Физические свойства

Физические свойства материала характеризуют какую-либо особенность его физического состояния (например, плотность) или отношение материала к каким-либо процессам (прохождение тепла, тока и т.д.).

1.2.1. Параметры состояния.

Истинная плотность ρ (г/см³, кг/м³) — масса единицы объема абсолютно плотного материала. Если масса материала m , а его объем в плотном состоянии V_a , то

$$\rho = m/V_a \quad (1.2.)$$

Относительная плотность d выражает отношение плотности материала и плотности стандартного вещества ρ при определенных физических условиях:

$$d = \frac{\rho(T_1; P_1)}{\rho_0(T_0; P_0)} \quad (1.3)$$

В качестве стандартного вещества удобно принять воду при $t + 4^\circ\text{C}$. имеющую при этой температуре плотность 1 000 кг/м³, 1 г/см³

Например, легкий бетон $p = 1400 \text{ кг/м}^3$, тогда $d = 1.4$.

Средняя плотность $p_0 = G/V$ – отношение массы тела G к объему V :

$$p = G/V. \quad (1.4)$$

Масса является скалярной величиной и не зависит от ускорения свободного падения, а вес пропорционален этому ускорению (равен mg и как всякая сила является вектором и измеряется H):

$$p = p \cdot g. \quad (1.5)$$

Объем пористого материала в естественном состоянии состоит из объема твердого материала V_a и объема пор V_n , которые могут заполняться воздухом и водой:

$$V_e = V_a + V_n.$$

Перед определением объема пор пробу материала высушивают в сушильном шкафу при $t = 105^\circ\text{C}$ до постоянной массы, то есть полного удаления гигроскопичной влаги. Откачивают воздух и вакуум насыщают жидкостью.

Объем жидкости, полностью заполнившей поровое пространство материала, равен объему пор в пробе материала V_n . В качестве замещающей жидкости применяют воду или керосин (для точных проб сжиженный гелий). Зная объем материала в естественном состоянии V_e и объем жидкости в порах получим:

$$V_a = V_e - V_n$$

затем вычисляют плотность по формуле 1.2.

Метод предусматривает измельчение предварительно высушенной пробы в порошок, проходящей через сетку с отверстиями $0,125 \text{ мм}$.

Абсолютный объем V_a навески m измеряют с помощью пикнометра. его принимают равным объему вытесненной порошком жидкости.

Средняя плотность – $p_m = m/V_e$. (1.6.)

Значение плотности данного материала в сухом состоянии m и влажном p_{mv} состояниях связаны соотношением:

$$p_m = p_{mv} / (1 + W_n) \quad (1.7)$$

где W_n – количество воды в литрах (доли от массы).

Насыпная плотность (p_n) – масса единицы объема рыхло-насыпных зернистых или волокнистых материалов (цемента, песка, гравия, щебня, гранулированной минеральной ваты) истинная плотность 2700 кг/м^3 , насыпная плотность известного щебня – 1300 кг/м^3 .

Пористость (Π) есть степень заполнения объема– материала порами:

$$\Pi = V_n/V_e \quad (1.8.)$$

Пористость выражается в долях объема материала, принимаемого за 1 или в% от объема.

Экспериментально-расчетный метод определения пористости использует найденные открытым путем значения плотности высушенного материала, входящие в формулу для вычисления пористости (формула 1.10) путем преобразования формулы 1.9.:

$$\Pi = \left[\frac{p - p_m}{p} \right] \times 100 \quad (1.9)$$

$$\Pi = \left(1 - \frac{p_m}{p} \right) \cdot 100 \quad (1.10)$$

Пористость строительных материалов колеблется в широких пределах от 0 до 98 %.

Пустотность определяется: $\Pi_{\text{пуст}} = \left(1 - \frac{p_{m0}}{p_m} \right)$

Коэффициент плотности (Кпл) – степень заполнения объема материала твердым веществом:

$$K_{пл} = p_m / p$$

В сумме: $\Pi + K_{пл} = 1$.

Открытая пористость (Π_o) равна отношению суммарного объема всех пор, насыщающихся водой, к объему материала (V_e):

$$\Pi_o = \frac{m_2 - m_1}{V_e} \cdot \frac{1}{\rho_{H_2O}}$$

где m_1, m_2 – масса образца соответственно в сухом и насыщенном водой состояниях.

Закрытая пористость (Π_z) равна:

$$\Pi_z = \Pi - \Pi_o$$

Удельная поверхность (S , г/см²) пропорциональна массе (m) адсорбированного водяного пара, необходимой для полного покрытия мономолекулярным слоем всей внутренней поверхности пор (в г на 1 г сухого материала):

$$S = \frac{a_1 \cdot N}{M} \cdot m$$

где a_1 – поверхность, покрываемая сухой абсорбируемой молекулой, $a = 10,6 \cdot 10$ см², $N = 6,06 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, M – молекулярная масса адсорбированного газа (водяного пара $M = 18$).

Плотность ρ (г/см³, кг/м³) – масса единицы объема абсолютно плотного материала. Если масса материала m , а его объем в плотном состоянии V_a , то

$$\rho = m / V_a \quad (1.11)$$

Относительная плотность выражает плотность материала по отношению к плотности воды (это безразмерная величина).

За немногими исключениями (металлы, стекло, мономинералы) строительные материалы пористы. Объем пористого материала в естественном состоянии (т.е. вместе с заключенными в нем порами) V_e складывается из объема твердого вещества V_a и объема пор V_n (рис. 1.15)

$$V_e = V_a + V_n$$

Перед определением объема пор пробу материала высушивают в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы, т.е. до полного удаления гигроскопической влаги. Подготовленную пробу помещают в герметически закрытый сосуд, из которого откачивают воздух, и в вакууме насыщают материал жидкостью. Объем жидкости, полностью заполнившей поровое пространство, равен объему пор в пробе материала. В качестве замещающей жидкости применяют воду и керосин (для цементных материалов). Для точных измерений объема пор используют сжиженный гелий, учитывая его сверхтекучесть и способность проникать в тонкие поры. Зная объем материала в естественном состоянии и определив объем заключающихся в нем пор, находят объем, занимаемый веществом $V_a = V_e - V_n$, и вычисляют плотность по приведенной выше формуле.

Стандартный метод определения плотности и пористости материалов (бетона, кирпича и др.) предусматривает измельчение предварительно высушенной пробы в порошок, проходящий через сетку с отверстиями 0,25 мм. Абсолютный объем V_a навески m порошка измеряют с помощью пикнометра: его принимают равным объему вытесненной порошком жидкости. Плотность вычисляют по формуле (1.11).

Объемная масса γ (г/см³, кг/м³) есть масса единицы объема материала в естественном состоянии (объем V_e определяется вместе с порами):

$$\gamma = m/V_e \quad (1.12)$$

Значения объемной массы данного материала в сухом γ и влажном состояниях γ_e связаны соотношением

$$\gamma = \gamma_e / (1 + W_M), \quad (1.13)$$

где W_M – количество воды в материале, доли от его массы.

Объемная масса пористых материалов всегда меньше их плотности. Например, объемная масса легкого бетона – 500–1800 кг/м³, а его плотность – 2600 кг/м³.

Объемная масса строительных материалов колеблется в очень широких пределах: от 15 (пористая пластмасса – мипора) до 7850 кг/м³ (сталь).

Основные свойства распространенных строительных материалов даны в табл. 4.

Объемная насыпная масса γ_n – масса единицы объема рыхло насыпанных зернистых или волокнистых материалов (цемента, песка, гравия, щебня, гранулированной минеральной ваты и т. п.). Например, плотность известняка – 2700 кг/м³, его объемная масса – 2500 кг/м³, а объемная насыпная масса известнякового щебня – 1300 кг/м³. По этим данным можно вычислить пористость известняка и пустотность щебня, пользуясь приведенными ниже формулами.

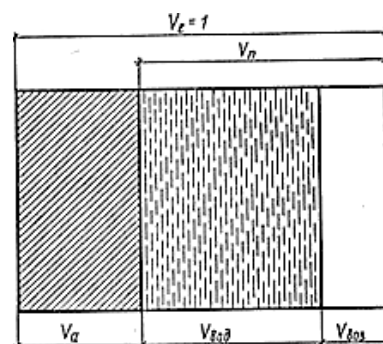


Рис. 1.15. Схема составных частей пористого материала:

V_a – абсолютный объем; V_e – объем в естественном состоянии (с порами); $V_{вод}$ – объем воды; $V_{воз}$ – объем воздуха; V_n – объем пор

Таблица 4

Основные свойства строительных материалов (в воздушно-сухом состоянии)

Наименование материала	Плотность, г/см ³	Объемная масса, г/см ³	Пористость, %	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Бетон:				
тяжелый	2,6	2,4	10	1,16
легкий	2,6	1,0	61,5	0,35
ячеистый	2,6	0,5	81	0,2
Кирпич:				
обыкновенный	2,65	1,8	32	0,8
пустотелый	2,65	1,3	51	0,55
Природные камни:				
гранит	2,7	2,67	1,4	2,8
вуланический туф	2,7	1,4	52	0,5
Стекло:				
оконное	2,65	2,65	0,0	0,58
пеностекло	2,65	0,30	88	0,11
Полимерные материалы:				
стеклопластик	2,0	2,0	0,0	0,5
мипора (вспененный полимер)	1,2	0,015	98	0,03
Древесные материалы:				
сосна	1,53	0,5	67	0,17
древесноволокнистая плита	1,5	0,2	86	0,06

1.2.2. Структурные характеристики

Строение пористого материала характеризуется общей открытой и закрытой пористостью, распределением пор по их радиусам, средним радиусом пор и удельной внутренней поверхностью пор.

Пористость P есть степень заполнения объема материала порами:

$$П = V_n / V_e \quad (1.14)$$

Пористость выражают в долях от объема материала, принимаемого за 1, или % от объема.

Экспериментальный (прямой) метод определения пористости основан на замещении порового пространства в материале сжиженным гелием или другой средой и описан выше.

Экспериментально-расчетный метод определения пористости использует найденные опытным путем значения плотности и объемной массы высушенного материала (p и y), входящие в формулу для вычисления пористости (в %)

$$П = \left(1 - \frac{p}{y}\right) 100$$

Пористость строительных материалов колеблется в широких пределах: от 0 до 98 % (табл. 4).

Коэффициент плотности $k_{пл}$ — степень заполнения объема материала твердым веществом:

$$K_{пл} = y/p$$

В сумме $П + k_{пл} = 1$ (или 100%), т.е. высушенный материал можно представить состоящим из твердого каркаса, обеспечивающего прочность, и воздушных пор.

Открытая пористость $П_o$ равна отношению суммарного объема всех пор, насыщающихся водой, к объему материала V_e :

$$П_o = \frac{m_2 - m_1}{V_e} \frac{1}{\rho_{H_2O}}$$

где m_1 и m_2 — масса образца соответственно в сухом и насыщенном водой состоянии.

Открытые поры материала сообщаются с окружающей средой и могут сообщаться между собой, поэтому они заполняются водой при обычных условиях насыщения, например при погружении образцов материала в ванну с водой. Открытые поры увеличивают проницаемость и водопоглощение материала и ухудшают его морозостойкость.

Закрытая пористость $П_z$ равна:

$$П_z = П - П_o$$

Пористый материал обычно содержит и открытые, и закрытые поры; увеличение закрытой пористости за счет открытой повышает его долговечность. Однако в звукопоглощающих материалах и изделиях умышленно создается открытая пористость и перфорация, необходимые для поглощения звуковой энергии.

Давление ртути, МПа

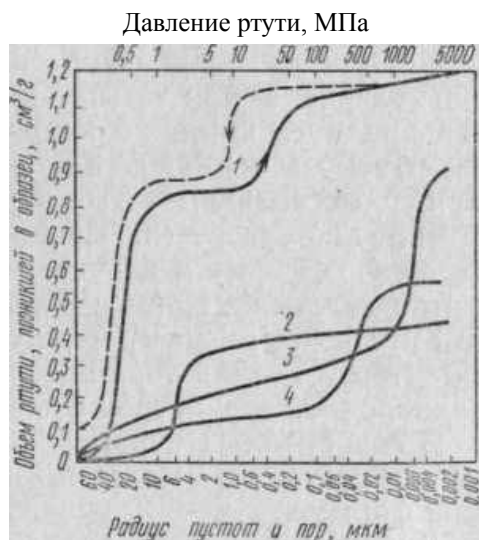


Рис. 1.16. Интегральные кривые распределения пор по радиусам (пунктиром показана кривая гистерезиса)

Распределение пор по размерам характеризуется: а) интегральной кривой распределения объема пор по их радиусам в единице объема материала (рис. 1.16); б) дифференциальной кривой распределения объема пор по их радиусам (рис. 1.17).

Ртутная порометрия позволяет определить размер (радиус) пор и объем пор каждого размера, а также оценить форму пор. Ртуть не смачивает большинство неорганических строительных материалов и проникает в поры лишь под действием приложенного давления; при повышении давления ртуть будет проникать во все мелкие поры, что видно из следующего уравнения:

$$P_d = 4 \sigma \cos \theta$$

где P – прилагаемое давление; d – диаметр пор; σ – поверхностное натяжение ртути; θ – краевой угол смачивания ртути и анализируемого материала.

Уравнение показывает, что при нулевом избыточном давлении несмачивающая жидкость не будет проникать в поры. Диаметр пор для определенного давления получают из приведенного уравнения, правая часть которого для данного материала величина постоянная. На рис. 1.18 приведено соотношение между давлением и диаметром пор.

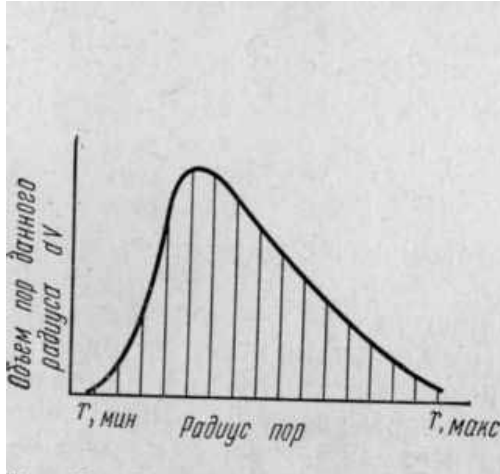


Рис. 1.17. Дифференциальная кривая распределения пор по радиусам

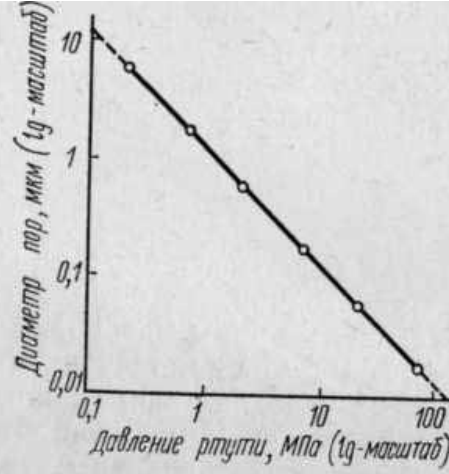


Рис. 1.18. График зависимости между давлением ртути (в поромере) и размером пор

Интегральные кривые распределения пор по их размерам приведены на рис. 1.16 для четырех различных материалов: по оси x отложены радиусы пор, а по оси y – объем пор данного размера (он равен объему заполняющей их ртути). Кривая 1 характерна для материалов с большим объемом крупных пустот размером более 10 мкм. Гистерезис (на кривой 1) показывает, что поры имеют «бутылочную» форму и некоторый объем ртути в них остается после снятия давления. Кривая 2 получена для порошка с большим объемом пустот (4–6 мкм) между зернами. Наоборот, для материала 3 характерна мелкая пористость. Кривая 4 характерна для материала с одной структурой с порами 0,02–0,04 мкм.

В современных поромерах измерение пористости автоматизировано, и результат выдается в готовом виде в цифровой и графической формах.

Дифференциальная кривая распределения объема пор V_n по их размерам (см. рис. 1.17):

$$\frac{dV_n}{dr} = f_v(r)$$

где $\frac{dV_n}{dr}$ – тангенс угла наклона касательной к интегральной кривой.

Площадь под дифференциальной кривой (на рис. 1.17 заштрихована) равна суммарному объему пор в единице объема материала.

Удельную поверхность порового пространства вычисляют, используя средний условный радиус пор, или определяют прямыми адсорбционными методами (по адсорбции водяного пара, азота и другого инертного газа).

Удельная поверхность S (см²/г) пропорциональна массе m адсорбированного водяного пара (или газа), необходимой для полного покрытия мономолекулярным слоем всей внутренней поверхности пор (в 1 г на 1 г сухого материала):

$$S = \frac{a_1 N}{M} m$$

где a_1 – поверхность, покрываемая одной адсорбированной молекулой. Для молекулы воды $a_1 = 10,6 \cdot 10^{-16}$ см²; $N = 6,06 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро; M – молекулярная масса адсорбированного газа (для водяного пара $M = 18$).

Все свойства материала определяются его составом и строением и прежде всего величиной и характером пористости. Это видно из данных табл. 4, в которой попарно сопоставлены плотные и пористые материалы, имеющие в основном общий химический состав.

1.2.3. Гидрофизические свойства

Гидрофизические свойства материалов показывают их отношение к воде. Различают три формы связи воды с твердыми материалами: химическую, физико-химическую и физико-механическую.

Химическая связь устанавливается в результате реакций гидратации или при образовании кристаллогидратов. При образовании химической связи вода входит в состав нового вещества и не удаляется при испарении.

Физико-химическая связь воды устанавливается в результате адсорбции или осмоса. При этом на поверхности материала удерживаются тонкие слои воды, обладающие особыми свойствами, приближающимися к свойствам упругого твердого тела. Образование адсорбционных слоев воды приводит к изменению ряда свойств твердых тел – их пластификации, понижению твердости, набуханию.

Основная масса физико-механически удержанной воды свободная и сохраняет свои свойства. Этот вид связи наиболее слабый, он разрушается при испарении воды, отжати ее механическими и другими способами.

Взаимодействие воды, так же как и других жидкостей, с поверхностью твердого тела проявляется в смачивании, обусловленном силами молекулярного взаимодействия твердых тел с жидкостями. Оно вызывает растекание жидкости по поверхности и пропитывание пористых тел и порошков. Смачивают твердую поверхность только жидкости, которые уменьшают поверхностное натяжение на границе с воздухом. Вода смачивает материалы с высокополярной химической связью: бетон, керамику, горные породы и др. Не смачиваются материалы со слабым межмолекулярным взаимодействием в поверхностном слое – полимеры, битумы и др.

Свойство материалов смачиваться водой называется гидрофильностью, а не смачиваться – гидрофобностью. Мерой смачиваемости является краевой угол (ϕ), образуемый на твердой поверхности каплей жидкости.

Для гидрофильных материалов угол острый, для гидрофобных – тупой.

Пористые гидрофильные материалы обладают гигроскопичностью – способностью поглощать воду из воздуха. Гигроскопичность обусловлена адсорбцией воды на поверхности и в микрокапиллярах материала. Она измеряется отношением количества поглощенной влаги к массе материала и увеличивается с возрастанием влажности и уменьшением температуры окружающей среды. Гигроскопическая влажность колеблется в зависимости от особенностей структуры материалов:

песок – 4–9 %.

керамика – 5–7 %.

древесина – 12–18 %,

ячеистые бетоны – 20 % и более.

Гигроскопическое увлажнение приводит обычно к неблагоприятному изменению ряда свойств строительных материалов. Например, снижению активности цемента, набуханию древесины и снижению ее прочности, увеличению теплопроводности теплоизоляционных материалов.

При непосредственном соприкосновении материалов с водой их увлажнение происходит за счет капиллярного всасывания, диффузии и заполнения водой открытых пор.

Капиллярное всасывание – способность материалов поглощать жидкости в результате их подъема по капиллярам – вызывается силами поверхностного натяжения, возникающими на границе раздела твердой и жидкой фаз и характеризуется высотой подъема (h):

$$h = 2 \sigma \cos \phi / r g p,$$

где a – поверхностное натяжение; ϕ – краевой угол смачивания, r – радиус капилляра, p – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Возможность увлажнения материалов за счет капиллярного всасывания необходимо учитывать при эксплуатации зданий и сооружений. Для предотвращения увлажнения грунтовыми водами нижних частей зданий устраивают гидроизоляционный слой, отделяющий их от фундаментов. Капиллярное всасывание можно использовать для пропитки пористых материалов защитными составами.

Степень заполнения пор материала водой характеризуется водопоглощением. Различают водопоглощение по массе (B_m) и объему (B_v):

$$B_v = \frac{m_l - m}{V} \cdot 100\% \quad B_m = \frac{m_l - m}{m} \cdot 100\%$$

$$B_v = B_m P_0,$$

где m – масса образца, насыщенного водой; m – масса сухого образца; V – объем образца в естественном состоянии; p – средняя плотность материала.

Водопоглощение по объему характеризует открытую или так называемую кажущуюся пористость.

Для ряда материалов, применяемых при строительстве плотин, резервуаров, коллекторов и других напорных сооружений, важным свойством является водопроницаемость – способность протекать воду под давлением. Водопроницаемость материалов характеризуется коэффициентом фильтрации (K_f), показывающим количество воды (V_b), просочившееся в течение определенного времени (t) через единицу площади (S) испытываемого материала толщиной δ при разности гидростатического давления $p_1 - p_2 = 1$ м вод ст:

$$K_f = \frac{V_b \cdot \delta}{S(p_1 - p_2)}$$

Водопроницаемость или применяемая часто при характеристике материалов водонепроницаемость измеряется также предельным давлением, при котором вода проходит через образец. В зависимости от значения предельного давления (1...10 МПа) для бетонов, например, установлены марки по водонепроницаемости – W2, W4, W6, W8, W12.

Способность материала сохранять механические свойства при насыщении водой – водостойкость материала характеризуется коэффициентом размягчения (K_p):

$K_p = R_n / R_c$, где R_n – прочность образца в насыщенном водой состоянии, R_c – прочность сухого образца.

Способность насыщенного водой материала не разрушаться при воздействии знакопеременной температуры называется морозостойкостью. Количественно морозостойкость оценивается марками, равными числами циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы при снижении прочности не более 5–25 % и массы не более 5 %. Морозостойкость возрастает с повышением водостойкости материалов их прочности при растяжении.

Гигроскопичностью называют свойство капиллярно-пористого материала поглощать водяной пар из влажного воздуха. Поглощение влаги из воздуха обусловлено полимолекулярной адсорбцией водяного пара на внутренней поверхности пор и капиллярной конденсацией. Этот физико-химический процесс называется сорбцией и является обратимым. Древесина, теплоизоляционные, стеновые и другие пористые материалы обладают развитой внутренней поверхностью пор и поэтому высокой сорбционной способностью.

С повышением давления водяного пара (т.е. с увеличением относительной влажности воздуха при постоянной температуре) возрастает сорбционная влажность данного материала (рис. 5). Согласно эмпирическому уравнению Фрейндлиха количество адсорбированного газа

$$a = kp^{1/n}$$

где p – давление газа при достижении равновесия; k и n – эмпирические параметры, постоянные для данных адсорбента и газа при определенной температуре.

В логарифмических координатах это уравнение выражается отрезком прямой

Кривая, выражающая зависимость количества адсорбируемого газа от давления, после насыщения внутренней поверхности пор стремится к прямой, параллельной оси абсцисс (точка L на рис. 1.19).

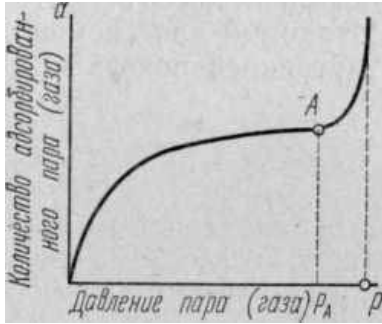


Рис. 1.19. Изотерма адсорбции

(при $p > p_a$ круто поднимается вверх вследствие капиллярной конденсации)

Дальнейшее увеличение гигроскопической влажности материала происходит вследствие капиллярной конденсации. В узких капиллярах материала, который хорошо смачивается водой (древесина, кирпич, бетон и т.и.), мениск всегда будет вогнутым и давление насыщенного пара под ним будет ниже, чем над плоской поверхностью. В результате пар, не достигший давления насыщения по отношению к плоской поверхности, может быть пересыщенным по отношению к жидкой фазе в тонких капиллярах и будет конденсироваться в них. Вследствие процессов адсорбции и капиллярной конденсации водяного пара из атмосферы влажность пористых строительных материалов даже после их длительной выдержки в воздухе достаточно велика. Так, равновесная влажность воздушно-сухой древесины составляет 12–18%, стеновых материалов 5–7% по массе. Увлажнение сильно увеличивает теплопроводность теплоизоляции, поэтому стремятся предотвратить увлажнение, покрывая плиты утеплителя гидроизоляционной пленкой.

Капиллярное всасывание воды пористым материалом происходит, когда часть конструкции находится в воде. Так, грунтовые воды могут подниматься по капиллярам и увлажнять нижнюю часть стены здания. Чтобы не было сырости в помещении, устраивают гидроизоляционный слой, отделяющий фундаментную часть конструкции стены от ее надземной части.

Капиллярное всасывание характеризуется высотой поднятия воды в материале, количеством поглощенной воды и интенсивностью всасывания.

Высоту h поднятия жидкости в капилляре определяют по формуле Жюрена

$$h = 2\sigma \cos \theta / (rpg)$$

где σ – поверхностное напряжение; θ – краевой угол смачивания; r – радиус капилляра; p – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Поры в бетоне и других материалах имеют неправильную форму и изменяющееся поперечное сечение, поэтому приведенная формула годна лишь для качественного рассмотрения явления; высоту всасывания воды определяют, применяя метод «меченых атомов», либо по изменению электропроводимости материала.

Объем воды, поглощенный материалом путем капиллярного всасывания за время t , в начальной стадии подчиняется параболическому закону

$$V^2 = Kt$$

где K – константа всасывания.

Уменьшение интенсивности всасывания (т.е. значения K) отражает улучшение структуры материала (например, бетона) и повышение его морозостойкости.

Водопоглощение пористых материалов (бетона, кирпича и др.) определяют по стандартной методике, выдерживая образцы в воде. Температура используемой воды должна быть $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Водопоглощение, определяемое погружением образцов материала в воду, характе-

ризуется в основном открытую пористость, так как вода не проникает в закрытые поры. К тому же при извлечении образцов из ванны вода частично вытекает из крупных пор, поэтому водопоглощение обычно меньше пористости. Например, пористость легкого бетона может быть 50–60 %, а его водопоглощение составляет 20–30 % объема.

Водопоглощение определяют по объему и массе.

Водопоглощение по объему W_o (%) – степень заполнения объема материала водой:

$$W_o = \frac{m_B - m_C}{V_e} 100$$

где m_B – масса образца материала, насыщенного водой, г; m_C – масса образца материала в сухом состоянии, г.

Водопоглощение по массе W_m (%) определяют по отношению к массе сухого материала

$$W_m = \frac{m_B - m_C}{m_C} 100$$

Разделив почленно на W_o/W_m , получим (%)

$$W_o = W_m y$$

причем объемная масса сухого материала y выражается по отношению к плотности воды (безразмерная величина).

Водопоглощение различных материалов колеблется в широких пределах: гранита – 0,02–0,7 %, тяжелого плотного бетона – 2–4 %, кирпича – 8–15 %, пористых теплоизоляционных материалов – 100 % и больше. Водопоглощение по массе высокопористых материалов может быть больше пористости, но водопоглощение по объему никогда не может превышать пористость.

Водопоглощение используют для оценки структуры материала, привлекая для этой цели коэффициент насыщения пор водой k_n равный отношению водопоглощения по объему к пористости:

$$k_n = W_o / \Pi$$

Коэффициент насыщения может изменяться от 0 (все поры в материале замкнутые) до 1 (все поры открыты), тогда $W_o = \Pi$. Уменьшение k_n (при той же пористости) свидетельствует о сокращении открытой пористости, что обычно проявляется в повышении морозостойкости.

Водопоглощение отрицательно влияет на основные свойства материала: увеличивается объемная масса, материал набухает, его теплопроводность возрастает, а прочность и морозостойкость понижаются.

Коэффициент размягчения k_p – отношение прочности материала, насыщенного водой R_B , к прочности сухого материала R_C

$$k_p = R_B / R_C$$

Коэффициент размягчения характеризует водостойкость материала, он изменяется от 0 (размокающие глины и др.) до 1 (металлы и др.). Природные и искусственные каменные материалы не применяют в строительных конструкциях, находящихся в воде, если их коэффициент размягчения меньше 0,8.

Водопроницаемость – это свойство материала пропускать воду под давлением.

Коэффициент фильтрации k_ϕ (м/ч) характеризует водопроницаемость материала

$$k_\phi = V_B a / [S(p_1 - p_2)t]$$

где $k_\phi = V_B$ количество воды, м³, проходящей через стенку площадью $S = 1$ м², толщиной $a = 1$ м за время $t = 1$ ч при разности гидростатического давления на границах стенки $p_1 - p_2 = 1$ м вод. ст. Коэффициент фильтрации имеет размерность скорости.

Водонепроницаемость материала (бетона) характеризуется маркой, обозначающей одностороннее гидростатическое давление (в кгс/см²), при котором бетонный образец-цилиндр не пропускает воду в условиях стандартного испытания. Между коэффициентом фильтрации и маркой по водонепроницаемости имеется определенное соотношение: чем ниже k_f , тем выше марка по водонепроницаемости.

С водопроницаемостью борются в строительстве гидротехнических сооружений, резервуаров, коллекторов, при возведении стен подвалов. Стремятся применять достаточно плотные материалы с замкнутыми порами, устраивают гидроизоляционные слои, экраны.

Газо- и паропроницаемость. При возникновении у поверхностей ограждения разности давления газа происходит его перемещение через поры и трещины материала. Поскольку материал имеет макро- и микропоры, перенос газа может происходить одновременно вязкостным и молекулярным потоками, которые подчиняются соответственно законам Пуазейля и Кнудсена.

Использование закона Дарси-Пуазейля при небольших перепадах давлений, когда можно пренебречь изменением плотности газа, приводит к упрощенной формуле для определения массы газа Vp (плотностью ρ), прошедшего через стенку площадью S и толщиной a за время t при разности давлений на гранях стенки Δp :

$$Vp = k_m St \Delta p / a$$

Отсюда можно определить коэффициент газопроницаемости $[г / (м \cdot ч \cdot Па)]$

$$k_g = a Vp / (St \Delta p)$$

При определении коэффициента газопроницаемости объем проходящего газа приводят к нормальным условиям.

Стеновой материал должен обладать определенной проницаемостью. Тогда стена будет «дышать», т. е. через наружные стены будет происходить естественная вентиляция, что особенно важно для жилых зданий, в которых отсутствует кондиционирование воздуха. Поэтому стены жилых зданий, больниц и т. п. не отделывают материалами, задерживающими водяной пар. Наоборот, стены и покрытия влажных производственных помещений необходимо защищать с внутренней стороны от проникновения водяного пара. В зимнее время внутри теплых помещений (текстильных фабрик, коммунальных предприятий, коровников, свиноводников и т. п.) в 1 м³ воздуха содержится водяного пара значительно больше, чем снаружи, поэтому пар стремится пройти через стену или покрытие. Попадая в холодную часть ограждения, пар конденсируется, резко повышая влажность в этих местах. Создаются условия, способствующие быстрому разрушению материала (легкого бетона, кирпича) наружной ограждающей конструкции при действии мороза.

Паронепроницаемые материалы должны располагаться с той стороны ограждения, с которой содержание водяного пара в воздухе больше.

В ряде случаев необходима практически полная газонепроницаемость; это относится к емкостям для хранения газов, а также к специальным сооружениям, внутреннее пространство которых должно быть защищено от проникновения зараженного воздуха (например, газоубежища).

Паро- и газопроницаемость в большой степени зависят от структуры материала (объемной массы и пористости) (табл. 5).

Влажностные деформации. Пористые неорганические и органические материалы (бетоны, древесина и др.) при изменении влажности изменяют свой объем и размеры.

Таблица 5

Относительные значения паро- и газопроницаемости (за 1 принята проницаемость кирпича)

Материал	Объемная масса, кг/м ³	Пористость, %	Относительные значения	
			паропроницаемости	газопроницаемости
Кирпич глиняный	1800	31	1	1
Легкий бетон	1800	31	0,8	0,9
Кирпич трепельный	1100	58	2,2	4,2
Известняк	2000	23	0,7	1,2
Бетон на гравии	2200	15	0,25	0,1

Усадкой (усушкой) называют уменьшение размеров материала при его высыхании. Она вызывается уменьшением толщины слоев воды, окружающих частицы материала, и действием внутренних капиллярных сил, стремящихся сблизить частицы материала.

Набухание (разбухание) происходит при насыщении материала водой. Полярные молекулы воды, проникая в промежутки между частицами или волокнами, слагающими материал, как бы расклинивают их, при этом утолщаются гидратные оболочки вокруг частиц, исчезают внутренние мениски, а с ними и капиллярные силы.

Чередование высыхания и увлажнения пористого материала, часто встречающееся на практике, сопровождается попеременными деформациями усадки и набухания. Такие многократные циклические воздействия нередко вызывают появление трещин, ускоряющих разрушение. В подобных условиях находится бетон в дорожных покрытиях, в наружных частях гидротехнических сооружений.

Высокопористые материалы (древесина, ячеистые бетоны), способные поглощать много воды, характеризуются большой усадкой:

Вид материала	Усадка, мм/м
Древесина (поперек волокон)	30–100
Ячеистый бетон	1–3
Строительный раствор	0,5–1
Кирпич глиняный	0,03–0,1
Тяжелый бетон	0,3–0,7
Гранит	0,02–0,06

Усадка возникает и увеличивается, когда из материала удаляется вода, находящаяся в гидратных оболочках частиц и в мелких порах. Испарение воды из крупных пор не ведет к сближению частиц материала и практически не вызывает объемных изменений.

Морозостойкость – свойство насыщенного водой материала выдерживать попеременное замораживание и оттаивание. Морозостойкость материала количественно оценивается маркой по морозостойкости. За марку материала по морозостойкости принимают наибольшее число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы материала без снижения прочности на сжатие более 15 %; после испытания образцы не должны иметь видимых повреждений – трещин, выкрашивания (потери массы – не более 5 %). От морозостойкости зависит долговечность строительных материалов в конструкциях, подвергающихся действию атмосферных факторов и воды.

Марка по морозостойкости, устанавливается проектом с учетом вида конструкции, условий ее эксплуатации и климата. Климатические условия характеризуются среднемесячной температурой наиболее холодного месяца и числом циклов попеременного замораживания и оттаивания по данным многолетних метеорологических наблюдений.

Легкие бетоны, кирпич, керамические камни для наружных стен зданий обычно имеют морозостойкость Мрз15, Мрз25, Мрз35. Однако бетон, применяемый в строительстве мостов и дорог, должен иметь марку Мрз50, Мрз100 и Мрз200, а гидротехнический бетон – до Мрз500.

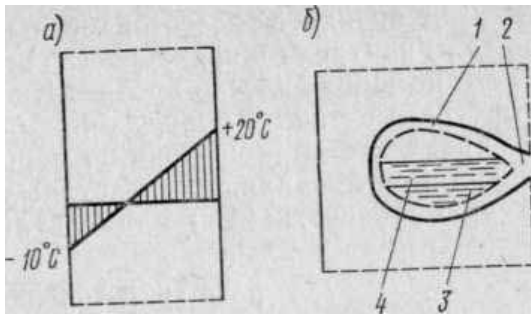


Рис. 1.20. Распределение температуры в наружной стене здания (а) и заполнение поры водой (б), выделенной вблизи фасадной грани

1 – адсорбированная вода; 2 – устье поры; 3 – дождевая вода; 4 – конденсат

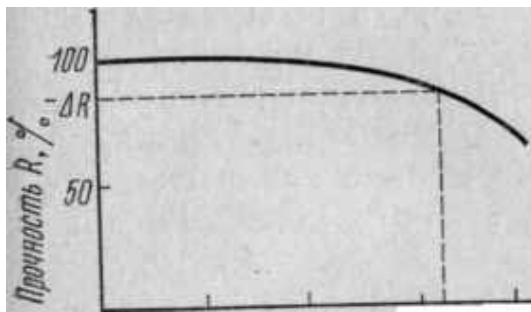


Рис. 1.21. Кривая изменения прочности бетона при попеременном замораживании и оттаивании

Испытание морозостойкости материала в лаборатории проводят на образцах установленной формы и размеров (бетонные кубы, кирпич, и т. п.) Перед испытанием образцы насыщают водой. После этого водонасыщенные образцы замораживают в холодильной камере при температуре от -15 до -20°C , чтобы замерзла вода в тонких порах. Извлеченные из холодильной камеры образцы оттаивают в воде с температурой 15 – 20°C , что обеспечивает водонасыщенное состояние образцов.

Для оценки морозостойкости все шире применяют физические методы контроля и прежде всего импульсный ультразвуковой метод. С его помощью можно проследить изменение прочности или модуля упругости бетона в процессе циклического замораживания (рис. 1.21) и определить марку бетона по морозостойкости в циклах замораживания и оттаивания, число которых соответствует допустимому снижению прочности (ΔR) или модуля упругости (ΔE).

1.2.4. Теплофизические свойства

Отношение к тепловому воздействию определяет технологические и эксплуатационные показатели качества материалов.

Мера тепловой энергии, необходимая для повышения температуры материала на 1°C называется теплоемкостью. Теплоемкость определяют экспериментально с помощью калориметров с использованием уравнения теплового баланса системы.

При различии температур в материале происходит передача теплоты от более нагретых поверхностей к менее нагретым. Теплопроводность обусловлена колебательным движением частиц (керамика, природные камни, стекло) или движением электронов и столкновением

Рассмотрим причины разрушения пористого материала под влиянием совместного действия на него воды и мороза. Для примера возьмем материал, находящийся в ограждающей конструкции. Осенью наружная часть стены промерзает. В это время происходит миграция (перемещение) пара «от тепла к холоду», т. е. пар стремится наружу, поскольку его давление при отрицательной температуре ниже, чем при положительной. Например, давление пара при $+20^{\circ}\text{C}$ составляет $2,33$ кПа, а при -10°C оно равно только $0,27$ кПа. Таким образом, поры наружной промерзающей части стены оводняются (рис. 1.20), причем вода прибывает сюда как снаружи (дождь с ветром), так и изнутри (миграция водяного пара).

При наступлении даже небольших морозов (от -5 до -8°C) вода в крупных порах замерзает и при переходе в лед увеличивается в объеме на 9% (плотность льда $0,918$). Если коэффициент насыщения водой хотя бы части пор приблизится к 1 , то в стенках пор возникнут большие растягивающие напряжения. Разрушение начинается обычно в виде «шелушения» поверхности бетона, затем оно распространяется вглубь.

Воздействие на бетон попеременного замораживания и оттаивания подобно многократному воздействию повторной растягивающей нагрузки, вызывающей усталость материала.

их с атомами (металлы). Для минеральных кристаллических материалов теплопроводность уменьшается с повышением температуры, для аморфных материалов характерна обратная зависимость.

Мерой теплопроводности (λ) является количество теплоты, передаваемое за единицу времени через единицу поверхности при разности температур в 1°C . Ее находят экспериментально, основываясь на уравнении:

$$Q = \lambda \frac{F \cdot \tau \cdot \Delta t}{\delta}$$

где Q – количество теплоты, Дж., F – площадь сечения, перпендикулярная направлению теплового потока, м^2 ; τ – время прохождения теплового потока; Δt – разность температур, $^\circ\text{C}$; δ – толщина материала, м.

Величина, обратная теплопроводности, называется термическим сопротивлением. Теплопроводность уменьшается по мере усложнения химического состава материалов. строения их пространственной решетки, перехода от кристаллического строения к аморфному, она чувствительна к изменению пористости.

Теплопроводность – один из определяющих показателей качества теплоизоляционных материалов, применяемых для низведения стен и покрытий зданий.

Увеличение амплитуды колебаний при нагревании приводит к изменению межатомного расстояния и к тепловому расширению тел. Для его характеристики используют обычно температурный коэффициент линейного расширения, учитываемый при устройстве температурных швов, нанесении защитных покрытий, подборе составов композиционных материалов.

С уменьшением коэффициента линейного расширения возрастает термостойкость – способность материала сохранять механические свойства при одно- и многократных термических воздействиях. Термостойкость определяют обычно температурой, нагревание до которой при последующем быстром охлаждении резко понижает прочность материала. Термостойкость увеличивается с повышением теплопроводности и прочности, уменьшением модуля упругости, увеличением однородности материалов.

Свойство материала противостоять воздействию высоких температур, не расплавляясь, называется огнеупорностью. Огнеупорность характеризуют температурой, при которой образец в форме пирамиды деформируется и вершиной касается основания.

При высоких температурах материалы могут разрушаться до начала плавления. Способность материалов противостоять химическому разрушению при высокой температуре называется жаростойкостью, а сохранять физико-механические свойства при воздействии огня в условиях пожара – огнестойкостью.

Теплопроводностью называют свойство материала передавать тепло от одной поверхности к другой. Это свойство является главным как для большой группы теплоизоляционных материалов так и для материалов, применяемых для устройства наружных стен и покрытий зданий.

Тепловой поток проходит через твердый «каркас» и воздушные ячейки пористого материала. Теплопроводность воздуха $[\lambda = 0,023 B_T / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})]$ меньше, чем у твердого вещества, из которого состоит «каркас» строительного материала. Поэтому увеличение пористости материала является основным способом уменьшения теплопроводности. Стремятся создавать в материале мелкие закрытые поры, чтобы снизить количество тепла, передаваемого конвекцией и излучением.

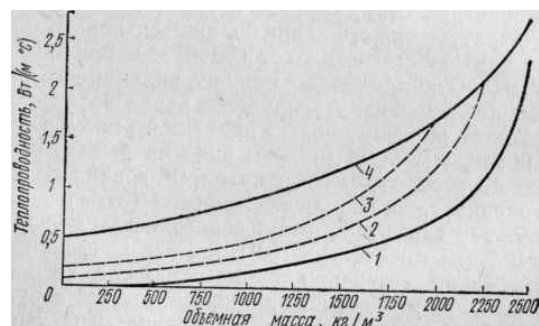


Рис. 1.22. Зависимость теплопроводности неорганических материалов от объемной массы:

1 – сухие материалы; 2 и 3 – воздушно-сухие материалы с разной влажностью; 4 – материалы, насыщенные водой

На практике удобно судить о теплопроводности по объемной массе материала (см. рис. 1.22). Известна формула В. П. Некрасова связывающая теплопроводность $[\lambda = B_T / (м \cdot ^\circ C)]$ с объемной массой каменного материала $\gamma_{об}$, выраженной по отношению к воде:

$$\lambda = 1,16\sqrt{0,0196 + 0,22\gamma_{об}^2} - 0,16$$

Точное значение λ определяют для данного материала экспериментально.

Влага, попадающая в поры материала, увеличивает его теплопроводность, так как теплопроводность воды ($0,58 B_T / (м \cdot ^\circ C)$) в 25 раз больше, чем теплопроводность воздуха. Замерзание воды в порах с образованием льда еще более увеличивает λ , так как коэффициент теплопроводности льда равен 0,1, а льда – $2,3 B_T / (м \cdot ^\circ C)$, т.е. в 4 раза больше, чем воды. При повышении температуры теплопроводность большинства материалов возрастает и лишь у не многих (металлов, магнетитовых огнеупоров) она уменьшается.

Теплоемкость определяется количеством тепла, которое необходимо сообщить 1 кг данного материала, чтобы повысить его температуру на $1^\circ C$. Теплоемкость неорганических строительных материалов (бетонов, кирпича, природных каменных материалов) изменяется в пределах от 0,75 до 0,92 кДж/(кг $\cdot ^\circ C$). Теплоемкость сухих органических материалов (например, древесины) – около 8,7 кДж/(кг $\cdot ^\circ C$), вода имеет наибольшую теплоемкость – 4,2 кДж/(кг $\cdot ^\circ C$), поэтому с повышением влажности материалов их теплоемкость возрастает.

Огнеупорность – свойство материала выдерживать длительное воздействие высокой температуры (от $1580^\circ C$ и выше), не размягчаясь и не деформируясь. Огнеупорные материалы применяют для внутренней футеровки промышленных печей.

Тугоплавкие материалы размягчаются при температуре выше $1350^\circ C$.

Огнестойкость – свойство материала сопротивляться действию огня при пожаре в течение определенного времени. Она зависит от сгораемости материала, т.е. от его способности воспламеняться и гореть.

Несгораемые материалы – это бетон, кирпич, сталь и др. Однако необходимо учитывать, что некоторые несгораемые материалы при пожаре растрескиваются (гранит) или сильно деформируются (металлы) при температуре, начиная с $600^\circ C$. Поэтому конструкции из подобных материалов нередко приходится защищать более огнестойкими материалами.

Трудносгораемые материалы под воздействием огня или высокой температуры тлеют, но после прекращения действия огня их горение и тление прекращается (асфальтобетон, пропитанная антипиренами древесина, фибролит, некоторые пенопласты).

Сгораемые органические материалы, которые горят открытым пламенем, необходимо защищать от возгорания. Широко используют конструктивные меры, исключаящие непосредственное воздействие огня на материал в условиях пожара. Применяют защитные вещества – антипирены.

Коэффициент линейного температурного расширения бетона и стали $10 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-1}$, гранита $-10 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-1}$, дерева $-20 \cdot 10^{-6} ^\circ C^{-1}$. При сезонном изменении температуры окружающей среды и материала на $50^\circ C$ относительная температурная деформация достигает $0,5 \cdot 10^{-3}$ или $1 \cdot 10^{-3}$, т.е. 0,5 – 1 мм/м. Во избежание растрескивания сооружения большой протяженности разрезают деформационными швами.

1.2.5. Электрофизические свойства

Одним из основных электрофизических свойств материалов является их электропроводность – способность проводить электрический ток. Измеряют электропроводность отношением плотности тока к напряженности электрического поля (удельная объемная электропроводность).

Характерные твердые электропроводные материалы – металлы и их сплавы. Электроизоляционные – керамика, стекло, слюда, асбест. Свойством, обратным электропроводности, является электрическое сопротивление.

Способность электроизоляционных материалов сохранять высокое электрическое сопротивление в электрических полях большой напряженности называется электрической прочностью. Она определяется напряженностью электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика, то есть резкое увеличение его электропроводности до уровня, близкого к электропроводности металла.

1.2.6. Радиационная стойкость

Радиационная стойкость – это стойкость материалов по отношению к действию ионизирующего излучения. Она должна учитываться при возведении ряда конструкции применяемых при строительстве атомных электростанций, предприятий по производству изотопов и др. Из всех известных эксплуатационных факторов, воздействующих на материалы, облучение является наиболее сильным. Степень и глубина качественных изменений материалов зависит от дозы облучения. Основными параметрами ионизирующего излучения являются плотность потока частиц или квантов и их энергия.

Радиационная стойкость материалов зависит от их состава и структуры. Например, радиационная стойкость горных пород и других каменных материалов возрастает по мере увеличения содержания в них аморфной фазы и уменьшения размера кристаллов. Для бетонов и растворов положительное значение имеют увеличение объема цементного камня, уменьшение крупности заполнителя.

Радиационные свойства строительных материалов.

Радиоактивностью называют неустойчивость ядер некоторых атомов, которая проявляется в их способности к самопроизвольному превращению (по-научному – распаду), что сопровождается выходом ионизирующего излучения – **радиации**. Энергия такого излучения достаточно велика, поэтому она способна воздействовать на вещество, создавая новые ионы разных знаков.

Ионизирующее излучение (радиация) – различные виды микрочастиц и физических полей, способные ионизировать вещество. В более узком смысле к ионизирующему излучению не относят ультрафиолетовое излучение и излучение видимого диапазона света, которое в отдельных случаях также может быть ионизирующим. Излучение микроволнового и радиодиапазонов не является ионизирующим. Вызывать радиацию с помощью химических реакций нельзя, это полностью физический процесс.

Радиоактивное заражение (радиационное заражение) – загрязнение местности и находящихся на ней объектов радиоактивными веществами.

Радиоактивное заражение происходит при:

– ядерном взрыве в результате выпадения радиоактивных веществ из облака ядерного взрыва и наведённой радиации, обусловленной образованием радиоактивных изотопов в окружающей среде под воздействием мгновенного нейтронного и гамма-излучений ядерного взрыва; поражает людей и животных главным образом в результате внешнего гамма- и (в меньшей степени) бета-облучения, а также в результате внутреннего облучения (в основном альфа-активными нуклидами) при попадании радиоизотопов в организм с воздухом, водой и пищей;

– техногенных авариях (утечках из ядерных реакторов, утечках при перевозке и хранении радиоактивных отходов, случайных утерях промышленных и медицинских радиоисточников и т.д.) в результате рассеяния радиоактивных веществ; характер заражения местности зависит от типа аварии.

Различают несколько видов радиации:

- **альфа-частицы** – это относительно тяжелые частицы, заряженные положительно, представляют собой ядра гелия;
- **бета-частицы** – обычные электроны;
- **гамма-излучение** – имеет ту же природу, что и видимый свет, однако гораздо большую проникающую способность;
- **рентгеновские лучи** – похожи на гамма-излучение, но имеют меньшую энергию. Солнце – один из естественных источников таких лучей, но защиту от солнечной радиации обеспечивает атмосфера Земли;
- **нейтроны** – это электрически нейтральные частицы, возникающие в основном рядом с работающим атомным реактором, доступ туда должен быть ограничен.

Наиболее опасно для человека альфа-, бета- и гамма-излучение, которое **может привести к серьезным заболеваниям**, лучевой болезни, генетическим нарушениям, бесплодию и даже смерти. Степень влияния радиации на здоровье человека зависит от вида излучения, времени и частоты.

Таким образом, **последствия радиации**, которые могут привести к фатальным последствиям, бывают как при однократном пребывании у сильнейшего источника излучения (естественного или искусственного), так и при хранении радиоактивных предметов у себя дома (антиквариата, обработанных радиацией драгоценных камней, изделий из радиоактивного пластика). Заряженные частицы очень активны и взаимодействуют с веществом. Впрочем, по этой же причине достаточным средством защиты от радиации данного типа является любой слой твердого или жидкого вещества, например, обычная одежда. Сами альфа-частицы не проходят через кожу: опасность представляет альфа-радиоактивные изотопы при попадании внутрь – тогда ткани подвергаются облучению изнутри.

Единицы измерения радиоактивности

Радиоактивность измеряется в беккерелях (Бк), что соответствует одному распаду в секунду. Содержание радиоактивности в веществе также часто оценивают на единицу веса – Бк/кг, или объема – Бк/куб.м. Иногда встречается такая единица как кюри (Ки). Это огромная величина, равная 37 миллиардам Бк. При распаде вещества источник испускает ионизирующее излучение, мерой которого является экспозиционная доза. Её измеряют в зивертах (Зв), когда речь идет о дозе, поглощаемой биологической тканью, или в рентгенах (Р), когда рассматривается ионизирующее воздействие радиации на атмосферный воздух.

Существует внесистемная единица измерения дозы бэр (биологический эквивалент рентгена), которая равна дозе полученной биологической тканью под действием радиации в 1 Р. Считается, что $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$. 1 зиверт – очень большая величина. Доза в 5–6 зивертов, полученная человеком, является смертельной. Поэтому на практике обычно пользуются миллизивертами (мЗв) и микрозивертами (мкЗв). Аналогично и с рентгеном – обычно речь идет миллирентгенах (мР) и микрорентгенах (мкР).

Бытовые дозиметры измеряют ионизацию за определенное время. Единица измерения – зиверт в час (рентген в час). Это очень высокие уровни радиации и на практике обычно используются дольные единицы милли– и микрозиверты в час (мЗв/ч, мкЗв/ч) и милли– и микрорентгены в час (мР/ч, мкР/ч). Интенсивность радиации надо учитывать, определяя опасность того или иного источника радиации и оценивая время, которое можно безопасно пребывать возле него.

Дозиметр – устройство для измерения дозы или мощности дозы ионизирующего излучения, полученной прибором (и тем, кто им пользуется) за некоторый промежуток времени, например, за период нахождения на некоторой территории или за рабочую смену. Измерение описанных величин называется дозиметрией.

Является ли компьютер источником радиации

Этот вопрос, в век распространения компьютерной техники, волнует многих. Единственной частью компьютера, которая теоретически может быть радиоактивной является монитор, да и то только электролучевой. Современные дисплеи, жидкокристаллические и плазменные, радиоактивными свойствами не обладают.

ЭЛТ-мониторы, как и телевизоры, являются слабым источником излучения рентгеновского типа. Оно возникает на внутренней поверхности стекла экрана, однако благодаря значительной толщине того же стекла оно и поглощает большую часть излучения. До настоящего времени не обнаружено влияния излучения ЭЛТ-мониторов на здоровье. Впрочем, при повсеместном применении жидкокристаллических дисплеев этот вопрос теряет былую актуальность.

Может ли человек стать источником радиации

Радиация, воздействуя на организм, не образует в нем радиоактивных веществ, т.е. человек не превращается сам в источник радиации, но при нейтронном облучении возникает наведенная радиоактивность.

Рентгеновские съемки, вопреки распространенному мнению, безопасны для здоровья. Но следует отметить, что безопасны единичные съемки, но десятки уже могут негативно повлиять на здоровье. А для зародыша в матке беременной вредны могут быть даже единичные дозы облучения.

Измерение уровня радиации

Достоверно проверить уровень радиации можно с помощью дозиметра или радиометра. Данные бытовые приборы незаменимы для тех, кто хочет предупредить опасное влияние радиации.

Основное предназначение дозиметра – измерение интенсивности радиации в том месте, где находится человек, обследование определенных предметов (грузов, стройматериалов, денег, продуктов питания, детских игрушек и т.п.). Приобрести прибор, измеряющий радиацию, необходимо тем, кто часто бывает в районах радиационного загрязнения, вызванных аварией на Чернобыльской АЭС (а такие очаги присутствуют практически во всех областях европейской территории России). Поможет дозиметр и тем, кто бывает в незнакомой местности, удаленной от цивилизации: в походе, собирая грибы и ягоды, на охоте. Обязательно необходимо обследовать на радиационную безопасность место предполагаемого строительства (или покупки) дома, дачи, огорода или земельного участка, иначе вместо пользы подобная покупка принесет только смертельно опасные заболевания.

Очистить продукты, землю или предметы от радиации практически невозможно, поэтому единственный способ обезопасить себя и свою семью – держаться от них подальше. А бытовой дозиметр поможет выявить потенциально опасные источники.

Нормы радиоактивности

В отношении радиоактивности существует большое число норм, т.е. стараются нормировать практически все. Другое дело, что нечистые на руку продавцы в погоне за большой прибылью не соблюдают, а иногда и откровенно нарушают нормы, установленные законодательством. Основные нормы, установленные в России, прописаны в Федеральном законе № 3-ФЗ от 05.12.1996 г «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 05.12.96 и в Санитарных правилах 2.6.1.1292–03 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)».

Основная задача радиационного контроля (измерений радиации или радиоактивности) состоит в определении соответствия радиационных параметров исследуемого объекта (мощность дозы в помещении, содержание радионуклидов в строительных материалах и т.д.) установленным нормам.

Для вдыхаемого воздуха, воды и продуктов питания регламентировано содержание как техногенных (полученных в результате деятельности человека), так и естественных

радиоактивных веществ, которые не должны превышать нормы, установленные СанПиН 2.3.2.560–96. В дополнение к НРБ-99 применяются «Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.560–96)».

В строительных материалах нормируется содержания радиоактивных веществ семейства тория и урана, а также калия-40 (в соответствии с НРБ-99), удельная эффективная активность их рассчитывается по специальным формулам:

Удельная эффективная активность ($A_{эфф}$) естественных радионуклидов в строительных материалах, используемых для вновь стоящих жилых и общественных зданий (1 класс),

$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085 A_K$ не должна превышать 370 Бк/кг, где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности радия-226 и тория-232, находящиеся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого семейств, A_K – удельная активность К-40 (Бк/кг).

Также применяются ГОСТ 30108–94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» и ГОСТ Р 50801–95 «Древесное сырье, лесоматериалы, полуфабрикаты и изделия из древесины и древесных материалов. Допустимая удельная активность радионуклидов, отбор проб и методы измерения удельной активности радионуклидов».

Согласно ГОСТ 30108–94 за результат определения удельной эффективной активности в контролируемом материале и установления класса материала принимается значение $A_{эфф м}$:

$$A_{эфф м} = A_{эфф} + DA_{эфф},$$

где $DA_{эфф}$ – погрешность определения $A_{эфф}$.

В помещениях регламентируется суммарное содержание торона и радона в воздухе: для новых зданий оно должно быть не больше 100 Бк (100 Бк/м³), а для уже эксплуатируемых – не более 200 Бк/м³. В Москве применяются также дополнительные нормы МГСН 2.02–97, где регламентируются максимально допустимые уровни ионизирующего излучения и содержание радона на участках застройки.

Для медицинской диагностики предельные дозовые значения не обозначены, однако выдвигаются требования минимально достаточных уровней облучения, чтобы получить качественную диагностическую информацию.

В компьютерной технике регламентируется предельный уровень излучения для электро-лучевых (ЭЛТ) мониторов. Мощность дозы рентгеновского излучения на любой точке на расстоянии 5 см от видеомонитора или персонального компьютера не должна превышать 100 мкР в час. Норма содержится в документе «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03).

Согласно нормам радиационной безопасности мощность эффективной дозы (МЭД) гамма-излучения в жилых и общественных зданиях не должна превышать среднего значения МЭД на открытой местности (в районе расположения здания) более чем на 0,3 мкЗв/ч (30 мкР/ч).

Среднее значение МЭД на открытой местности составляет 12–14 мкР/ч. То есть в соответствии с требованиями норм внутри помещений допустимы значения до 42–44 мкР/ч. Учитывая, что в помещениях городской житель проводит около 80 % времени, приходим к выводу, что домосед по сравнению с сельским жителем за время своей жизни получит дозу, в 2,8 раз большую:

$$X_r = X_c \cdot (42 / 12) \cdot 0,8 = 2,8$$

Здесь X_r и X_c – дозы, получаемые горожанином и сельским жителем соответственно.

При расчете дозы X_c , получаемой сельским жителем учитывать только МЭД на открытой местности правомерно, поскольку большинство сельских жителей проживают в домах,

основным конструктивным материалом которых является древесина. В таких домах МЭД внутри помещений мало отличается от радиационной обстановки на местности.

Но, если в деревянных домах МЭД сопоставима с радиационной обстановкой на местности, почему же тогда в нормативных документах предусматривается допустимое превышение ее значения на 0,3 мкЗв/ч?

Причина в том, что в помещениях основными источниками радиации являются сами ограждающие конструкции.

В табл. 6 приведены значения радиоактивности различных строительных материалов по данным Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН.

Таблица 6

Удельная эффективная активность строительных материалов

Строит, материал	Аэфф, Бк/кг	Строит, материал	Аэфф, Бк/кг
Дерево	1,1	Портландцемент	45
Гипс природный	29	Кирпич	126
Песок и гравий	34	Гранит	170

Очевидно, что внутри помещений в зданиях, построенных из материалов с повышенным содержанием радионуклидов, уровень гамма-излучения будет выше, чем на открытой местности. Хотя бы потому, что, будучи вне помещения, человек облучается с одной стороны (от поверхности грунта), а в помещении он окружен источниками радиоактивности со всех 6 сторон. Поэтому, даже если содержание радионуклидов в ограждающих конструкциях ниже, чем в грунте, МЭД, как правило, превосходит естественный радиационный фон.

Кардинальным способом снижения радиационной нагрузки на человека в помещениях является применение в строительстве эффективных строительных материалов и конструкций на их основе.

Например, кубометр пенобетона плотностью 0,4 т/куб. м имеет радиоактивность в 5,5 раз ниже, чем такой же по составу тяжелый бетон плотностью 2,2 т/куб. м. Кроме того, пенобетон обладает низким коэффициентом теплопроводности и стену можно выполнить менее толстой. То есть вес одного квадратного метра стены уменьшится в 33 раза. Соответственно уменьшится и МЭД от такой ограждающей конструкции.

Чтобы определить вклад каждой из ограждающих конструкции на радиационную обстановку в помещении, надо определить параметр радиоактивности P_a , Бк/кв. м:

$$P_a = S \cdot G \cdot A_{эфф}$$

где S – площадь элемента, кв. м; G – масса элемента, кг; $A_{эфф}$ – удельная эффективная активность материала, Бк/кг.

Общий гамма-фон в помещении определяется в основном (если не учитывать гамма-излучение, проникающее в помещение извне через проемы и ограждения), как сумма параметров радиоактивности всех конструкции. Тогда, варьируя объемно-планировочные и конструктивные решения, можно подобрать вариант, обеспечивающий наиболее благоприятную радиационную обстановку. Или же оценить эффективность принимаемого решения не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

Для многослойных конструкций проводится суммирование эффектов. Например, если стена площадью 1 кв. м состоит из пенобетона толщиной $B_n = 0,3$ м, плотностью $Q_n = 0,4$ т/куб. м ($A_n = 40$ Бк/кг) и облицовочного кирпича толщиной $B_k = 0,065$ м и плотностью $Q_k = 1,8$ т/куб.м ($A_k = 180$ Бк/кг), то параметр радиоактивности составит:

$$P_a = B_n \cdot Q_n \cdot A_n + B_k \cdot Q_k \cdot A_k = 4,800 + 21,060 = 30,660 \text{ Бк/кв. м}$$

Из приведенного примера видно, что облицовка стены кирпичом является не самым экологичным вариантом, т.к. основным источником радиации является именно облицовочный кирпич.

Отсюда следует вывод, что архитектурно-планировочные и конструктивные решения нельзя принимать, замыкаясь лишь на эстетических или экономических аспектах. Нужно учитывать и экологические аспекты.

Для выполнения практических расчетов в табл. 7 приведены значения Аэфф некоторых строительных материалов.

Таблица 7

Удельная эффективная активность строительных материалов

Материал	Производитель	Аэфф, Бк/кг
Древесина лиственных пород	–	1–4
Древесина хвойных пород	–	3–6
Песок	АОЗТ «Береговое»	116
Песок кварцевый	ПК «Силикатчик» (Воскресенское мест.)	66–168
Щебень известняк	АО «Тургорское рудоуправление»	89–109
Щебень гранитный	ООО «Галс», Челябинск	116–202
Шлакопортландцемент	–	99 (50–168)
Блоки стеновые гипсовые и гипсобетонные	ЗАО «Челябинский завод гипсовых изделий»	66
Ячеистые блоки	АОЗТ «Честэм», п. Новосине-глазово	170–308
Кирпич керамический	Миасский керамический завод	142–186
Кирпич керамический	Коркино	136
Кирпич силикатный	ЗАО «Афина», Челябинск	159
Шифер	АО «Асбоцемент», Коркино	116–123
Лист гипсоволокнистый	АО «Уралгипс»	50

Как следует из приведенных данных, радиоактивность строительных материалов на основе материального сырья даже одного месторождения варьирует в весьма широких пределах, измеряющихся десятками и сотнями кг. Введение в их состав древесины позволит пропорционально снизить радиационный фон в помещениях.

Россия, обладающая богатыми лесными запасами, не может игнорировать это обстоятельство, и одним из приоритетных направлений развития строиндустрии должно быть применение эффективных и экологически безопасных материалов и изделий, в т.ч. с использованием древесины в качестве основного компонента.

1.3. Химические свойства

Химические свойства характеризуют способность материалов к химическим превращениям под влиянием веществ, находящихся с ними в непосредственном соприкосновении. Способность материалов не разрушаться в химически агрессивных средах характеризуют их химическую стойкость. Химическая стойкость зависит от структуры материалов и их состава. Повышение химической стойкости материалов достигается введением в их состав легирующих элементов, образованием защитных покрытий и другими способами. Химический состав неметаллических кислотостойких материалов представлен преимущественно кислотными оксидами, щелочестойких – основными оксидами.

Разрушение материалов в результате физического или химического взаимодействия их с окружающей средой называют коррозией. Химическая коррозия материалов происходит под воздействием газов, воды, водных растворов солей и кислот, органических веществ. Химическая коррозия металлов заключается в их окислении и образовании окислов. Для металлов распространена электрохимическая коррозия, происходящая при их взаимодействии с электролитами.

Стойкость материалов к химической коррозии повышают, увеличивая их плотность, подбирая состав, вводя специальные вещества, замедляющие коррозионные процессы (ингибиторы), применяя различные защитные покрытия.

1.4. Структура материалов

Главным признаком кристаллической структуры является упорядоченность расположения материальных частиц в узлах и других точках пространственной решетки. Кристаллическую структуру имеют большинство горных пород, металлы и сплавы, разнообразные искусственные каменные строительные материалы.

Реальные кристаллы имеют разнообразные дефекты строения – мозаичную структуру, узловую вакансию атомов или ионов и др. Области с закономерными отклонениями в расположении элементов структуры кристаллов называют дислокацией.

Свойства кристаллических тел определяются видом характерных для них химических связей. Наиболее распространенные типы химических связей – это ионная и ковалентная.

В отличие от кристаллических аморфные материалы имеют неупорядоченное расположение атомов, ионов или молекул. Из аморфных материалов наибольшее применение в строительстве имеет стекло.

В зависимости от того, в каком агрегатном состоянии – твердом или жидком – распределено вещество в жидкой дисперсионной среде, дисперсную систему называют соответственно суспензией или эмульсией. Если дисперсная среда – газ, то системы называют аэрозолями.

Характерные механические свойства твердых материалов могут достигаться за счет срастания множества мелких кристалликов, возникающих из жидкой среды, например, при твердении бетонов и растворов или за счет развития химических связей, например, при получении полимеров, обжиге керамических и других изделий.

1.5. Оценка качества строительных материалов для гидротехнического строительства

Наилучшим грунтом для земляных плотин в гидротехническом строительстве следует считать грунт достаточно водонепроницаемый, деформирующийся (дающий осадку) без образования “трещин» и зон разрыхления, характеризующийся относительно большим углом внутреннего трения и удельной силой сцепления, удобообрабатываемый, то есть легко уплотняемый. Таким требованиям удовлетворяют супесчаные и суглинистые грунты, а также песок мелкий и средней крупности.

Идеальным грунтом для возведения тела плотины являлся бы грунт, скелет которого образован крупными частицами, а поры заполнены глиной. Он характеризуется относительно высоким углом внутреннего трения, отвечающим крупнозернистому грунту, и в то же время малым коэффициентом фильтрации, отвечающим глинистому. Само собой разумеется, что искусственное приготовление такого идеального грунта стоит дорого.

В некоторых случаях противифльтрационные устройства выполняют из так называемого глинобетона. Глинобетоном называют искусственную смесь гравия (или щебня), песка и глины. Эту смесь готовят в таких пропорциях, при которых поры гравия (щебня) оказываются полностью заполненными песком, а поры песка – глиной. Глинобетон обладает положительными свойствами глины (малой водопроницаемостью), песка и гравия (большой величиной угла внутреннего трения). Кроме того, глинобетон является грунтом, мало склонным к пучению зимой (так как в глинобетоне сравнительно мало глины, причем плотность глинобетона велика).

Качество камня, добываемого в карьерах и полезных выемках, оценивают на основе его физико-механических свойств. Для плотин 1 и 2 классов по капитальности при высоте их бо-

лее 50–70 метров главные физико-механические показатели камня и каменной наброски (удельный вес камня, пористость наброски, гранулометрический состав и угол естественного откоса наброски) уточняют обычно путем проведения опытных исследований в натуре.

Основные требования, предъявляемые к бетону как материалу, образующему плотину: монолитность, т. е. в нем по возможности должны присутствовать трещины и каверны; достаточная водонепроницаемость; с уменьшением фильтрационного расхода уменьшается также и интенсивность выщелачивания бетона:

атмосферо-, водо- и морозостойкость в такой степени, которая обеспечивает длительную нормальную службу (долговечность) его в соответствующих частях сооружения.

Кроме того, бетон должен обладать достаточной прочностью на сжатие; здесь, однако, следует учитывать, что это обстоятельство существенно только для высоких плотин: для массивных плотин средней высоты и низких бетон в теле плотины является недонапряженным (на сжатие).

Для того чтобы выдержать перечисленные условия:

используют соответствующий цемент и заполнители:

надлежащим образом подбирают состав бетонной смеси и, наконец,

соблюдают необходимые правила приготовления транспортирования и укладки бетонной смеси.

1.6. Долговечность и надёжность.

Долговечность

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами на ремонт. Предельное состояние определяется разрушением изделия, требованиями безопасности или экономическими соображениями. Долговечность строительных изделий измеряют обычно сроком службы без потери эксплуатационных качеств в конкретных климатических условиях и режиме эксплуатации. Например, для железобетонных конструкций нормами предусмотрены три степени долговечности: I – соответствует сроку службы не менее 100 лет, II – 50 лет, III – 20 лет.

Надежность

Надежность представляет собой общее свойство, характеризующее проявление всех остальных свойств изделия в процессе эксплуатации. Надежность складывается из долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости. Эти свойства связаны между собой.

Безотказностью называют свойство изделия сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации в течение некоторого времени без вынужденных перерывов на ремонт. К показателям безотказности относят вероятность безотказной работы.

Отказом называют событие, при котором система, элемент или изделие полностью или частично теряют работоспособность. Потеря работоспособности вызывается такой неисправностью, при которой хотя бы один из основных параметров выходит за пределы установленных допусков.

Ремонтпригодность – свойство изделия, характеризующее его приспособленность к восстановлению исправности и сохранению заданной технической характеристики в результате предупреждения, выявления и устранения отказов. Показателем ремонтпригодности является среднее время ремонта на один отказ данного вида, а также трудоемкость и стоимость устранения отказов.

Сохраняемость – свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного технической документацией. Сохраняемость количественно оценивают временем хранения и транспортирования до возникновения неисправности.

2. ГРУНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Общие сведения

Под грунтовыми материалами или местными мы понимаем:

- а) нескальные грунты (глинистые, песчаные, крупнообломочные)
- б) естественный камень, получаемый путем разработки скального грунта.

Естественный камень используется для образования каменной наброски. Кладку естественного камня – сухую и на растворе – в настоящее время у нас почти не применяют: такие работы не поддаются широкой механизации и требуют квалифицированной рабочей силы.

Плотины из грунтовых материалов строили еще до нашей эры. Однако теоретические основы инженерного проектирования их были разработаны только в самое последнее время на базе таких сравнительно новых дисциплин, как, например, механика грунтов, теория фильтрации, механика скальных пород и т.п.

С развитием средств транспорта и средств механизации, земляных и скальных работ строительство плотин из грунтовых материалов получает все большее распространение. Увеличились также размеры этих сооружений: если в начале нашего века такие плотины строились высотой до 20–30 м, то теперь их сооружают и более 100 м. Применение мощных средств механизации работ позволяет использовать для возведения рассматриваемых плотин искусственные смеси грунтов, прибегая к методам обогащения гранулометрического состава грунта определенными фракциями и т.п., что значительно улучшает качество плотин из грунтовых материалов.

Плотины из грунтовых материалов оказываются весьма экономичными конструкциями, если вблизи места работ имеется соответствующий грунт и камень, а место строительства плотины удалено от путей сообщения (что затрудняет доставку на строительство цемента, необходимого для постройки бетонной плотины).

Существенным положительным качеством рассматриваемого типа плотин является их долговечность, простота конструкции и производства работ по их осуществлению, в связи с чем для сооружения таких плотин не требуется большого количества квалифицированных рабочих.

Приведем официальную классификацию грунтов (согласно СНиП 2.06.05–84 «Плотины из грунтовых материалов»), которой ниже будем пользоваться.

Все грунты делятся на 4 вида:

- 1) скальные, залегающие в виде сплошного массива;
- 2) крупнообломочные, содержащие более 50 % (по весу) обломков кристаллических или осадочных пород с размером частиц более 2 мм;
- 3) песчаные – сыпучие, в сухом состоянии не обладающие свойством пластичности и содержащие менее 80 % (по весу) частиц крупнее 2 мм:

глинистые – связные, для которых число пластичности $W_p > 1$ ($W_p = W_T - W_r$ – число пластичности, где W_T и W_r – весовые влажности, выраженные в процентах от веса сухого грунта для двух состояний грунта: на границе текучести (W_T) и на границе раскатывания (W_r)).

Крупнообломочные, песчаные и глинистые грунты объединяются в группу нескальных грунтов.

Виды крупнообломочных и песчаных грунтов и их названия приведены в табл. 2.1. виды глинистых грунтов в табл. 2.2.

Таблица 2.1

Виды крупнообломочных и песчаных грунтов

Название грунтов	Расщепление частиц по крупности, % от веса сухого грунта
Крупнообломочный: щебенистый (при преобладании окатанных частиц – галечниковый)	Вес частиц крупнее 10 мм составляет более 50 %
дресвяный (при преобладании окатанных частиц – гравийный)	Вес частиц крупнее 2 мм составляет более 50 %
Песчаный: песок гравелистый	Вес частиц крупнее 2 мм составляет более 25 %
песок крупный	Вес частиц крупнее 0,5 мм составляет более 50 %
песок средней крупности	Вес частиц крупнее 0,25 мм составляет более 50 %
песок мелкий	Вес частиц крупнее 0,1 мм составляет более 70 %
песок пылеватый	Вес частиц крупнее 0,1 мм составляет более 75 %

Таблица 2.2

Виды глинистых грунтов

Название глинистого грунта	Число пластичности W_p
Супесь	$1 < W_p < 7$
Суглинок	$7 < W_p < 17$
Глина	$17 < W_p$

Приведем некоторые определения грунтов, которыми в дальнейшем будем пользоваться: неоднородный – грунт, имеющий различные физико-механические характеристики в различных точках его массы (гранулометрический, то есть зерновой состав, сдвиговые показатели, коэффициент фильтрации и т.п.). для однородного по гранулометрическому составу разнo-зернистого грунта кривые гранулометрического состава в указанных точках одинаковы:

– камень (естественный) или горная масса – материал, получаемый путем разрушения скального грунта;

– объемный (удельный) вес грунта (ρ) – вес единицы объема грунта, состоящей из объема твердой фазы грунта и соответствующего объема порового пространства, полностью или частично заполненного воздухом и (или) водой

– удельный вес частиц или скелета грунта ($\rho_{ск}$) – вес единицы объема твердой фазы (взятой в виде монолита из которой образован скелет грунта (его твердая фаза)

– удельный (или объемный) вес воды (ρ_v) – вес единицы объема воды;

– напор на плотине (Z) – разность уровней воды перед плотиной и за плотиной.

Для проектирования плотин и дамб из грунтовых материалов необходимо определять следующие основные характеристики грунтов, предназначенных для укладки в тело сооружений:

а) зерновой состав, а для глинистых грунтов, отсыпаемых в воду, – дополнительно количественное содержание комьев грунта по размеру;

б) плотность грунта (ρ)

в) плотность частиц грунта (ρ_3);

г) влажность грунта (W);

д) плотность сухого грунта (ρ_d при влажности $W = 0$ (для сыпучих грунтов в максимально плотном ($\rho_{d, max}$) и максимально рыхлом состояниях;

е) оптимальную влажность (W_{opt}) и оптимальную плотность сухого грунта ($\rho_{d, opt}$). Для глинистых грунтов эти величины определяют с учетом конкретных типов грунто уплотняющих механизмов;

ж) границы пластичности для глинистых грунтов (текучести W_L и W_p), а при необходимости – и максимальную молекулярную влагоемкость (W_m), а также минеральный состав глинистых частиц;

з) прочностные: угол внутреннего трения (ϕ), удельное сцепление (C), а также прочность на одноосное растяжение (ν) (в случаях необходимости – проверка трещиностойкости глинистых противофильтрационных устройств плотин и дамб);

и) деформируемости (коэффициент уплотнения $-a$, модуль деформации $-E$ и коэффициент поперечного расширения $-\eta$);

к) коэффициент фильтрации (K);

л) показатели фильтрационной прочности грунтов критические градиенты напора (при расчетах выпора – $I_{сг.и}$, суффозии – $I_{сг.р}$ и контактного размыва – $I_{сг.с}$) и критические скорости фильтрации;

м) показатели просадочности для глинистых (лессовых) грунтов;

н) характеристики набухания и усадки для глинистых грунтов, а также пучения при воздействии отрицательных температур.

Кроме того, необходимо определять содержание в грунтах водорастворимых солей, а также органических примесей и степень их разложения. Для камня и крупнообломочных пород следует определять водопоглощение и морозостойкость (если они предназначены для укладки в зонах промерзания).

Виды грунтов плотин и оснований, их физико-механические характеристики необходимо определять в соответствии с требованиями СНиП II-16–76.

Характеристики грунтов (прочностные, деформационные и фильтрационные) должны определяться экспериментально с учетом состояния грунтов по плотности и влажности, в котором они будут находиться в плотине в процессе ее строительства и эксплуатации, для плотин I класса – с учетом последовательности возведения и вида напряженного состояния.

2.2. Классификация плотин из грунтовых материалов

Створ плотины следует выбирать на основании технико-экономического сопоставления вариантов в увязке с компоновкой гидроузла и в зависимости от топографических, гидрологических и инженерно-геологических условий площадки строительства и требований охраны природной среды.

При прочих равных условиях следует, как правило, отдавать предпочтение створу плотины в наиболее узкой части долины реки, сложенной скальными породами.

Таблица 2.3

Классификация плотин из грунтовых материалов

Типы плотин	Отличительные признаки
Земляные насыпные	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых, отсыпают насухо с уплотнением или в воду
Земляные намывные	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых, намывают средствами гидромеханизации.
Каменно-земляные	Грунты тела – крупнообломочные, а для противофильтрационных устройств – от глинистых до мелкопесчаных.
Каменно-набросные	Грунты тела – крупнообломочные, противофильтрационные устройства – из негрунтовых материалов

При этом следует учитывать:

а) необходимость расположения водопропускных сооружений таким образом, чтобы исключить возможность опасных размывов берегов и подмыва плотины при сбросе воды в нижний бьеф;

б) возможность пропуска воды через створ плотины в период ее строительства, а также возможность прокладки по плотине и на подходах к ней дорог различного назначения как в период строительства, так и эксплуатации;

- в) целесообразность включения перемычек (банкетов), необходимых для перекрытия русла реки в период строительства гидроузла, в тело плотины;
- г) режим расходов и уровней водотока;
- д) условия пропуска льда, наносов, леса, судов, рыбы и другие специальные требования, предъявляемые к проектируемому объекту.

Таблица 2.4

Примеры плотин из грунтовых материалов

Название плотины	Год окончания строительства	Наибольшая высота, м	Страна
1	2	3	4
<i>Земляные плотины</i>			
Андерсон Рэнч	1950	139	США
Плотина ГАЭС	1959	125	Люксембург
Сер-Понсон	1961	122	Франция
Барири	1967	112	Бразилия
Грин Маунтин	1943	94	США
Грэнби	1950	91	США
Винзор	1940	90	США
Сионская	1962	85	США
Качума	1953	84	США
Алькова	1938	81	США
Мингечаурская	1953	80	США
Дир Крик	1941	72	США
Серебрянская № 2	1972	64	Россия
Капчагайская	1972	51	Казахстан
Иркутская	1958	41	Россия
Плотины из естественного камня			
<i>Набросные</i>			
Парадела	1956	110	Португалия
Солт Спрингс	1931	101	США
Кортрайт	1958	97	США
Уишон	1958	90	США
Дикс Ривер	1925	84	США
Сан Габриэл № 2	1937	78	США
Коготи	1931	75	Чили
Лауэр Бэр Ривер	1952	76	США
Фад	1968	68	Франция
Караун	1965	66	Ливан
Урто-Токойская	1953	59	
Широковская	1944	40	
Храмская	1947	32	
<i>Набросные с включением каменной кладки</i>			
Мальпасо	-	78	Перу
им. Г. Димитрова	1955	44	Болгария
Релиф	1912	40	США
<i>Из каменной кладки</i>			
Бакхада	1937	45	Алжир
Пиано Гречи	1923	39	Италия
Тепукстепек	1929	38	Мексика
<i>Каменно-земляные плотины</i>			
Нурекская		300	Узбекистан
Майка	-	240	Канада
Оривилл	1967	224	США
Кебан	-	203	Турция
Беннетт	1967	183	Канада

1	2	3	4
Чарвакская		168	Узбекистан
Тринити	1961	164	США
Кремаста	1966	163	Греция
Кугар	1963	158	США
Свифт	1959	156	США
Тарбелла	-	148	Пакистан
Мирабо	1960	130	Япония
Серебрянская № 1	1960	78	Россия
Виллюйская	1968	75	Россия
Усть-Хантайская	1970	65	Россия
Ириклинская	1958	43	Россия
Виллюйская ГЭС-3	2008	50	Россия
Курейская	2002	81,5	Россия
Маинская	1987	31,0	Россия
Богучанская	2015	96	Россия

В табл. 2.4 приведен перечень некоторых построенных плотин сравнительно большой высоты. В настоящее время во всем мире построено около 10 земляных плотин высотой более 100 м. В последнее время особенно высокие сооружают главным образом в виде каменно-набросных и каменно-земляных плотин, высота их достигает 300 м. Например, в США к 1957 г. было построено около 960 земляных плотин и примерно 140 с применением естественного камня. Из этих 140 плотин около 85 каменно-земляные и 55 – каменно-набросные и из каменной кладки.

2.3. Материалы для противοfiltrационных элементов

Для образования грунтовых противοfiltrационных устройств (экранов, понуров, ядер, зубьев) должны применяться маловодопроницаемые грунты – преимущественно суглинистые (естественные или в виде искусственной смеси) с коэффициентом фильтрации не выше 10 см/с.

Также надлежит руководствоваться следующими указаниями:

а) для устройства ядра и экрана может быть также использована после соответствующей подготовки глина твердой, полутвердой и тугопластичной консистенции;

б) глины, обладающие относительно небольшим сопротивлением сдвигу, допустимо применять для устройства центрального ядра и понура, для устройства экрана такие грунты не рекомендуются;

в) наиболее пригодными грунтами для образования противοfiltrационных элементов следует считать глинистые, имеющие естественную влажность, равную или большую влажности на границе раскатывания, но меньшую на границе текучести;

г) менее благоприятными следует считать грунты, содержащие большое количество минералов монтмориллонита;

д) для экранов и понуров плотин III–IV класса капитальности высотой до 20 м допускается использовать торф, имеющий степень разложения не менее 50 %;

е) при соответствующем экономическом обосновании для использования противοfiltrационных элементов может использоваться искусственная грунтовая смесь, содержащая глинистые частицы, песчаный и крупнообломочный грунт (различной крупности), а также камень. Иногда эту искусственную смесь называют глинобетоном. Глинобетон обладает положительными свойствами глины (малой водопроницаемостью), песка и гравия (большой величиной угла внутреннего трения). Глинобетон является грунтом, мало склонным к пуче-

нию зимой (так как в глинобетоне сравнительно мало глины, причем плотность глинобетона велика).

Однако необходимо помнить, что стоимость глинобетона высокая.

2.4. Грунты для земляных насыпных плотин

Земляные насыпные плотины по конструкции тела и противофильтрационных устройств в их основании подразделяются на следующие основные виды:

Таблица 2.5

Типы плотин по материалам

Отличительные конструктивные признаки	Вид плотины
Тело плотины	Однородная (рис. 2.1, а)
	Неоднородная (рис. 2.1, б, в)
	С экраном из негрунтовых материалов (рис. 2.1, г)
	С грунтовым ядром (вертикальным или горизонтальным)
	С негрунтовой диафрагмой (рис. 2.1, е)
	С грунтовым экраном (рис. 2.1, ж)
Противофильтрационных устройств в основании плотины	С зубом (рис. 2.1, г)
	С инъекционной (цементной и др) завесой (рис. 2.1, д)
	Со стенкой, шпунтом (рис. 2.1, е)
	С понуром (рис. 2.1, ж)

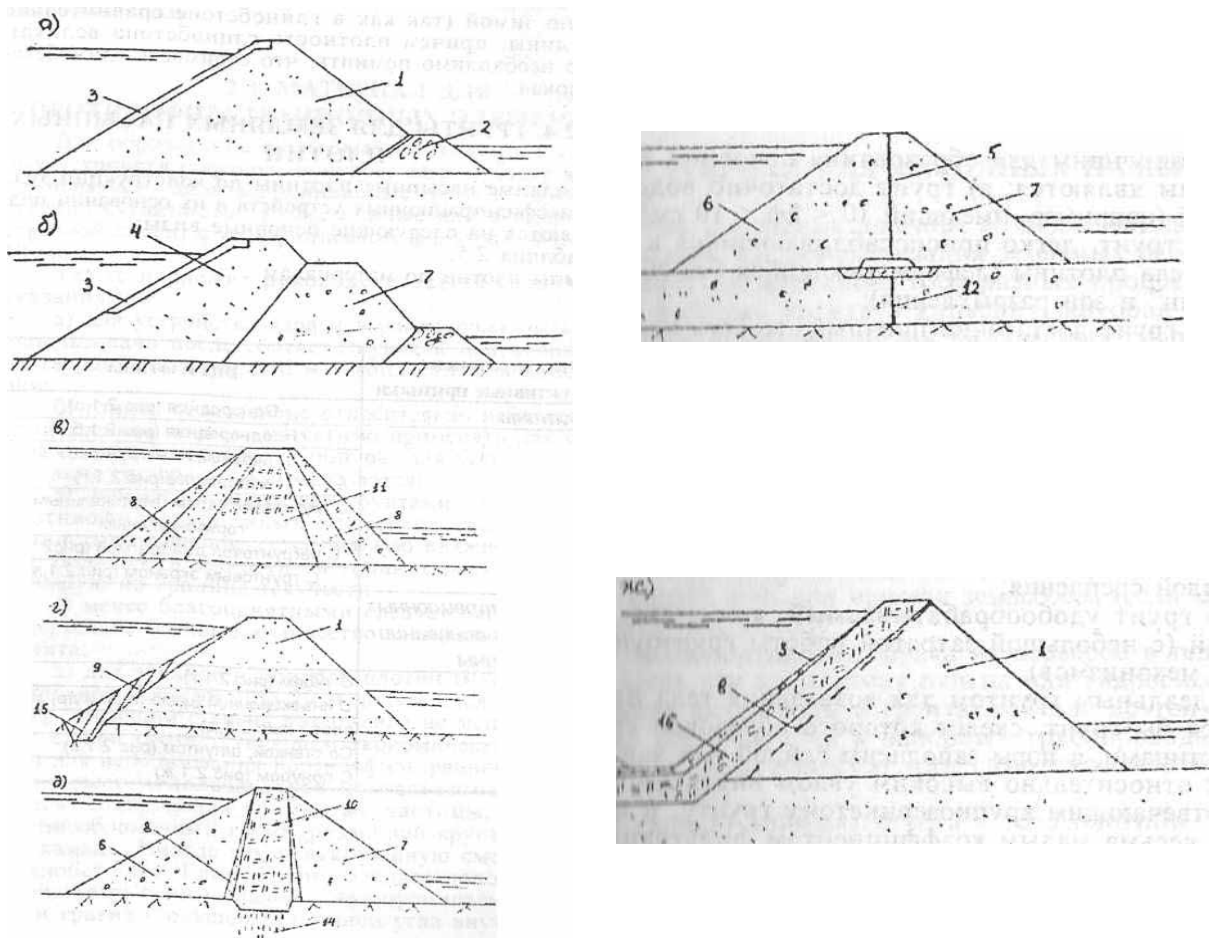


Рис. 2.1. Виды земляных насыпных плотин: 1 – тело плотины; 2 – дренаж; 3 – крепление откосов; 4 – верховая грунтовая противофильтрационная призма; 5 – диафрагма; 6 – верховая призма; 7 – низовая призма; 8 – переходный слой; 9 – экран из негрунтовых материалов; 10 – грунтовое ядро; 11 – центральная грунтовая противофильтрационная призма; 12 – шпунт или стенка; 13 – понур; 14 – инъекционная (цементная) завеса; 15 – зуб; 16 – грунтовый экран

Для образования основной части тела земляной насыпной плотины пригодны все виды грунтов, за исключением следующих:

а) содержащих водорастворимые включения в виде солей хлоридных и сульфато-хлоридных более 5 % по весу или солей сульфатных и хлоридно-сульфатных в количестве более 2 % по весу;

б) содержащих неполностью разложившиеся вещества (остатки растений) более 5 % по весу или подносит разложившиеся органические вещества, находящиеся в аморфном состоянии, в количестве более 8 % по весу.

Наилучшим для образования основной части тела плотины являются:

а) грунт достаточно водонепроницаемый (например, имеющий $10 < k_f < 10$ см/с);

б) грунт, легко приспособляющийся к деформациям тела плотины (деформирующийся без образования «трещин» и зон разрыхления);

в) грунт достаточно прочный, то есть характеризующийся большими углами внутреннего трения и удельной силой сцепления;

г) грунт удобообрабатываемый, т. е. легко уплотняемый (с небольшой затратой работы грунтоуплотняющих механизмов).

Идеальным грунтом для возведения тела плотины являлся бы грунт, скелет которого образован крупными частицами, а поры заполнены глиной. Он характеризуется относительно высоким углом внутреннего трения, отвечающим крупнозернистому грунту, и в то же время весьма малым коэффициентом фильтрации, отвечающим глинистому. Искусственное приготовление такого идеального грунта дорого.

Для возведения плотин намечают грунты, имеющиеся в достаточном количестве в карьерах, находящихся возможно ближе к месту строительства и расположенных несколько выше этого места.

2.4.1. Для образования дренажей и покрытий откосов могут применяться крупный и гравелистый песок, а также крупнообломочные грунты и камень. Эти материалы не должны содержать водорастворимых включений. Используемые крупнообломочные грунты и камень должны обладать морозостойкостью и не размокать в воде.

Для устройства грунтовых обратных фильтров должны применяться несвязные грунты (песчаные и крупнообломочные) естественные или искусственные, приготовленные путем отсева или обогащения имеющихся грунтов, также могут использоваться щебенистые отходы камнедробильных заводов, гранулированные металлургические шлаки и т. п.

2.5. Материал для земляных намывных плотин

Земляные намывные плотины возводят методом гидромеханизации. Гидромеханизация земляных работ предусматривает механизацию трех разных процессов:

1) Разработку грунта в карьерах, которая осуществляется или при помощи так называемых гидромониторов – «особых брандспойтов» (если карьеры находятся над водой), или при помощи землесосов (если карьеры находятся под водой);

2) транспортировку грунта из карьеров в тело плотины, здесь так называемая пульпа или гидросмесь (механическая смесь воды и грунта) той или другой консистенции перемещается в напорных трубопроводах (при помощи особых насосов) или самотеком в открытых лотках (реже);

3) укладку (намыв) грунта в тело плотины.

2.5.1. Различают следующие основные типы земляных намывных плотин:

– однородные плотины (рис. 2.2, а) – песчаные, супесчаные или суглинистые (в том числе лессовые);

– неоднородные гравийно-песчаные плотины (рис. 2.2, б) с ядерной (центральной) зоной, выполненной или глинистым, или песчаным грунтом.

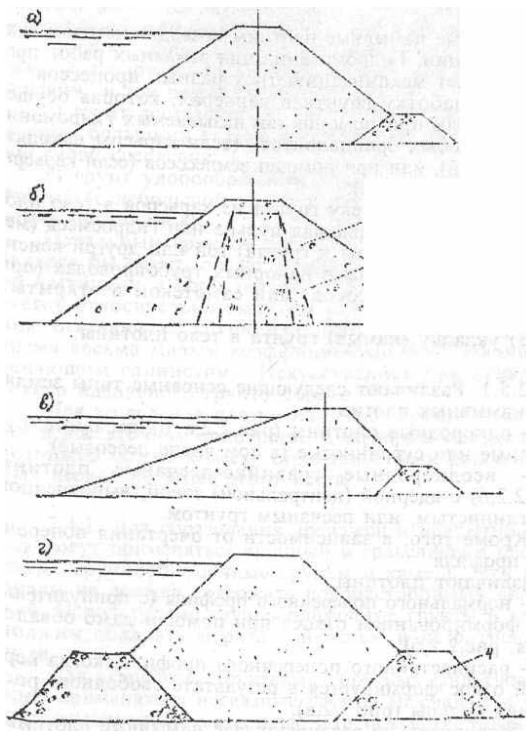


Рис. 2.2. Основные типы земляных намывных плотин:

а – ядерная (центральная) зона, выполненная глинистым или песчаным грунтом; б – промежуточная зона: в-боковая зона, выполненная гравийно-песчаным грунтом; г – боковая каменнонабросная призма (банкет)

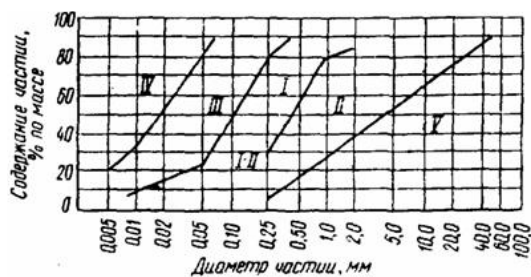


Рис. 2.3. Группы грунтов, используемых для намыва плотин

Кроме того, в зависимости от очертания поперечного профиля различают плотины:

– нормального поперечного профиля (с принудительным формированием откоса при помощи дамб обвалования рис. 2.2,6);

– распластанного поперечного профиля, когда верховой откос формируется в результате свободного растекания пульпы (рис. 2.2, в).

Дополнительно различают еще намывные плотины, та или другая часть которых образована насыпкой грунта или наброской камня (рис. 2.2, г, например, намывная плотина с боковыми каменнонабросными призмами – банкетами).

2.5.2. При выборе грунта для земляной намывной плотины необходимо руководствоваться следующим:

а) для приближенной оценки гранулометрического состава карьерного грунта, установления пригодности его для образования намывной плотины того или другого типа можно пользоваться графиком на рис. 2.3., поле которого разбито граничными кривыми на пять зон: если усредненная кривая гранулометрического состава карьерного грунта, (или смешанного грунта, полученного из различных карьеров) располагается в I зоне графика, то из него может возводиться однородная песчаная плотина; если указанная кривая располагается в III зоне, то из данного грунта может быть возведена однородная супесчаная или суглинистая (лессовая) плотина; если кривая гранулометрического состава располагается в II зоне, то в этом случае может возводиться неоднородная гравийно-песчаная ядерная плотина. Глинистые грунты IV зоны и галечниковые V зоны могут быть использованы при раздельном намыве соответственно: для образования ядерной зоны и боковых призм. Использование этих грунтов должно быть специально обосновано:

б) в ряде случаев может оказаться рациональным сооружение намывной плотины из смешанного грунта, добываемого из различных карьеров, и производство раздельного намыва, что должно быть обосновано в проекте;

в) при разработке средствами гидромеханизации гравийных и галечниковых грунтов необходимо учитывать наличие в них крупных фракций, размеры которых определяют возможность использования того или другого механического оборудования (землесосов и т.п.);

г) разработка в карьерах глины и ее обезвоживание в теле плотины связано со значительными трудностями, поэтому возможность использования этих грунтов должна быть соответствующим образом обоснована в проекте;

д) грунт ядерной зоны (в намытом состоянии) должен, как правило, содержать не более 20 % (по весу) глинистых фракций, размером менее 0,005 мм;

е) при намыве песчаной однородной плотины происходит сброс (вместе с осветленной водой, удаляемой за пределы тела плотины) мелких частиц грунта, крупностью до 0,01 мм и частично размером 0,01–0,1 мм (при намыве ядерных плотин этот сброс в части глинистых частиц можно регулировать в соответствии с требованиями п. д.).

2.5.3. При проектировании однородной плотины гранулометрический состав намывтого грунта следует принимать в соответствии с осредненным составом карьерного грунта, учитывая при этом сброс наиболее мелких фракций за пределы тела плотины. При проектировании неоднородной (ядерной) плотины гранулометрический состав отдельных ее частей необходимо устанавливать, учитывая фракционирование (раскладку фракций грунта и поперечном профиле плотины), имеющее место при намыве плотины. Фракционирование грунта необходимо устанавливать расчетом или на основании практических данных (по аналогам).

В особых случаях для **намывных** плотин 1 класса вопрос о фракционировании грунта должен окончательно решаться в проекте на основании исследования специально проведенного опытного намыва грунта.

2.6. Грунты для каменно-земляных и каменнонабросных плотин

Каменно-земляные плотины выполняют частично из земли (грунта), частично из каменной наброски.

Различают следующие типы каменно-земляных плотин:

- 1) плотины с грунтовым экраном (рис. 2.4.а);
- 2) плотины с ядром (рис. 2.4, б);
- 3) плотины с верховой земляной (грунтовой) призмой (рис. 2.4, в);
- 4) плотины с центральной земляной (грунтовой) призмой (рис. 2.4, г)

Главнейшей особенностью каменно-земляных плотин является сопряжение земляной ее части с каменнонабросной. В месте этого сопряжения приходится располагать особый элемент тела плотины или в виде обратного фильтра или так называемой переходной зоны.

Переходную зону тела плотины выполняют из песчаного и крупнообломочного грунтов, она имеет то же назначение, что и обратный фильтр, кроме того, она препятствует просыпанию сухого мелкозернистого грунта в поры крупнозернистого или камня. Переходная зона (однослойная, двухслойная или трехслойная) может иметь большую толщину, чем обратный фильтр, поэтому ее гранулометрический состав подбирают иногда с меньшей точностью.

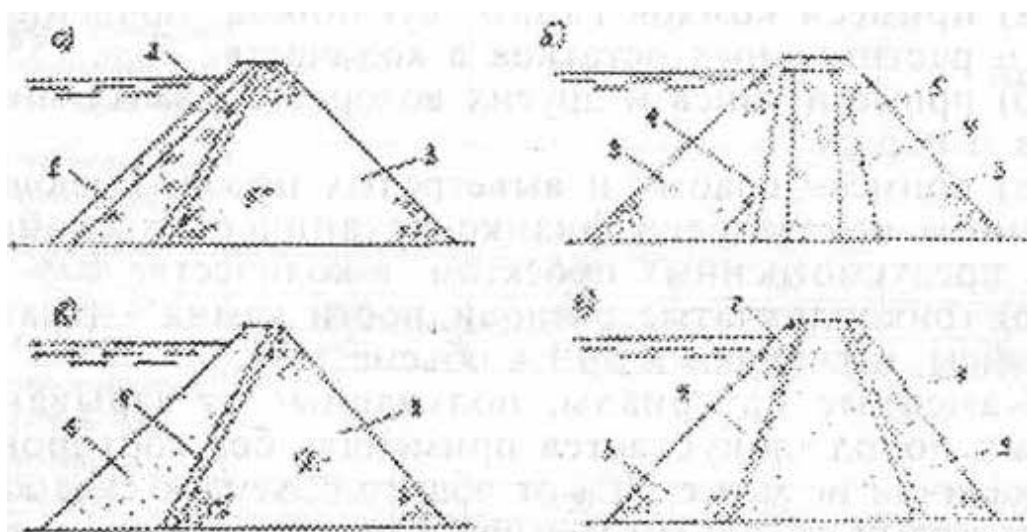


Рис. 2.4. Схемы основных типов каменно-земляных плотин:

1 – защитный слой; 2 – грунтовый экран; 3 – каменная наброска; 4 – переходная зона; 5 – ядро; 6 – верховая земляная (противофильтрационная) призма; 7 – центральная земляная (противофильтрационная) призма

2.6.1. К насыпным грунтам для образования противофильтрационных устройств и переходных зон каменно-земляных плотин следует предъявлять требования, указанные в пп. 2.2–2.3.

Качество камня надлежит оценивать на основе его физико-механических свойств. Для плотин применяется рваный камень, получаемый путем взрывания горных пород, окатанный камень (валуны и булыжный камень), колотый и пиленный камень и щебень.

При сухой кладке элементов рекомендуется применение постелистого камня.

Камни не должны иметь признаков выветривания, прослоек мягких пород, глины, гипса и других размокающих, растворимых, а также рыхлых включений, ракушек и видимых расслоений и трещин.

Содержание глины допускается не выше 3,5 % в цементирующей части известняков и других осадочных пород и не выше 5 % в открытых порах и кавернах. Содержание в камне сернокислых и сернистых соединений в пересчете на SO_2 , допускается не более 1 % по весу.

В массе, получаемой путем взрывания горных пород не допускается:

а) примеси комков глины, суглинков, почвенного слоя и растительных остатков в количестве более 5 %,

б) примеси гипса и других водорастворимых минералов и пород,

в) примеси слабых и выветрелых пород, имеющих величины показателей физико-механических свойств ниже предусмотренных проектом, в количестве 10 %;

г) тонкоплитчатые разновидности камня (гранито-гнейсы, песчаники и др.) в объеме 15 %.

Каменные материалы, получаемые от взрывания горных пород, допускается применять без сортировки при наличии не менее 50 % от общего объема кусков камня размерами от 200 мм и выше и при отсутствии в проекте специальных требований к размеру камней. Лучшим камнем для наброски следует считать рваный камень при значениях коэффициента разноразмерности >25 .

2.6.2. Применяемые для гидротехнического строительства камни разделяются:

а) по объемному весу в сухом состоянии: на тяжелые – свыше 1800 кг/м^3 , средние – $1500\text{--}1800 \text{ кг/м}^3$ и легкие с объемным весом $1000\text{--}1500 \text{ кг/м}^3$;

б) по прочности при сжатии: на низкопрочные (слабые) – с пределом прочности при сжатии $25\text{--}100 \text{ кгс/см}^2$, средней прочности – $150\text{--}400 \text{ кгс/см}^2$ и высокопрочные (прочные) – 500 кгс/см^2 и выше.

Таблица 2.6

Область применения камня

Область применения камня	Минимальная марка камин на сжатие			
	для районов с особо суровыми климатическими условиями		для районов с умеренными и суровыми климатическими условиями	
	не подверженных волновому воздействию	подверженных волновому воздействию	не подверженных волновому воздействию	подверженных волновому воздействию
1	2	3	4	5
Берегоукрепительные сооружения	400	500	300	400
Облицовка подводных частей набережных и др. сооружений	600	800	400	500
Каменнонабросная плотина при высоте, м.:				
до 20	400	500	400	500
от 20 до 60	500	600	500	600
более 60	600	800	600	800

Окончание табл. 2.6

1	2	3		4
Каменно-земляные плотины при высоте, м.:				
до 20	300	400	300	400
от 20 до 60	400	500	400	500
более 60	500	600	500	600
Дамбы, banquetы, наброски, рисбермы	300	400	300	400
Каменные плотины при сухой кладке	600	-	400	-
Крепление откосов	400	500	300	400
Заполнение ряжей и перемычек. Габионы	200	300	200	300

Для гидротехнических сооружений применяют камни марки которых по морозостойкости составляют 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 500, а объемный вес и показатели прочности, водостойкости и поглощения соответствуют указанным в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Характеристика каменного материала

Наименование горных пород	Марки камня по прочности при сжатии	Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии кгс/см ²	Объемный вес, кг/см ³ не менее	Коэффициент размягчения 0,5 не менее	Водопоглощение в% по массе, не более
1	2	3	4	5	6
<i>Камни средней прочности</i>					
Известняки и песчаники	150	100	1800		6 % для известняков и доломитов, 2 % для песчаника
	200	130	1900	0,75	
	300	200	2100		
	400	280	2100		
<i>Камни высокопрочные (прочные)</i>					
Известняки, доломиты, песчаники	500	350	2200		
	600	450	2300	0,75	То же
	800	600	2400		
	1000	750	2500		
Гранит, диорит, габбро	1000 и выше	1000 и выше	2500 и выше	0,90	
Базальт	500	500			
	600	600			
	800	800	2300 и выше	0,90	
	1000 и выше	1000 и выше		0,5	
Диабаз	1000 и выше	1000 и выше	2900 и выше	0,90	

Для камней, применяемых в гидротехнических сооружениях, подлежат определению следующие показатели свойств:

- предел прочности при сжатии,
- коэффициент размягчения,
- степень морозостойкости,
- при необходимости – растворимость.

Требования по прочности, морозостойкости и другим показателям в зависимости от назначения камня и условий эксплуатации приводятся в табл. 2.8.

2.6.3. Камень, образующий наброску высокими ярусами, должен удовлетворять требованиям, указанным в п. 2.5.1, п. 2.5.2. Для наброски тонкими слоями может быть использован любой камень. Дополнительно необходимо соблюдать следующие условия:

- при наброске тонкими слоями крупность камня не должна быть более 0.5–0.6 толщины набрасываемого слоя;
- желательно, чтобы форма камня приближалась к кубу, шару и т.п.;
- у откосов плотины (выполняемых наброской) рекомендуется располагать наиболее крупные камни, это условие особенно важно для сейсмических районов строительства;
- гранулометрический состав выполненной наброски должен быть достаточно однородным (одинаковым в различных местах поперечного профиля плотины), причем таким, который обеспечивал бы необходимую начальную плотность наброски.

Таблица 2.8

Характеристика морозостойкости камня

Область применения камня	Минимальная марка камня по морозостойкости	
	Для районов с особо, суровыми климатическими условиями	Для районов с умеренными и суровыми климатическими условиями
Части сооружений, находящиеся в зоне переменного горизонта воды	150	50–100
Надводные части	50–100	25–50
Подводные части	не нормируются	не нормируются

Для каменно-земляной плотины переходные зоны должны выполняться из карьерного или обогащенного крупнообломочного грунта, малослойные обратные фильтры – из сортированного и промытого грунта.

Для камня, предназначенного к укладке в плотину ниже поверхности воды или подверженного переменному ее воздействию, коэффициент размягчения должен быть не ниже:

- 0,9 – для изверженных метаморфических пород.
- 0,8 – для осадочных пород.

2.7. Основные требования к материалам

Земляные насыпные плотины можно возводить из всех видов грунтов, за исключением:

а) содержащих водорастворимые включения хлоридных солей более 5%. сульфатных или сульфатно-хлоридных более 10% по массе;

б) содержащих не полностью разложившиеся органические вещества (например, остатки растений) более 5% по массе или полностью разложившиеся органические вещества, находящиеся в аморфном состоянии, более 8%.

Указанные в подпунктах «а» и «б» грунты допускается применять для создания тела плотины при наличии соответствующего обоснования и при условии проведения необходимых защитных мероприятий, а также соблюдения правил охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами Водхоза РФ, Минздрава РФ, Рыбхоза РФ.

Для создания грунтовых противофильтрационных устройств в теле и основании плотины (экранов, ядер, понуров, зубьев) следует применять слабоводопроницаемые грунты.

При выборе этих грунтов надлежит учитывать следующее:

- наиболее пригодными грунтами для образования противофильтрационных устройств являются глинистые с коэффициентом фильтрации $k < 0.1$ м/сут и при числе пластичности $I_p > 0,05$ (при соответствующем обосновании $I_p > 0,03$);
- допускается применять искусственную грунтовую смесь, содержащую глинистые, песчаные, дресвяные и крупнообломочные грунты. Состав грунтовой смеси должен определять-

ся по результатам исследований и проверки его в производственных условиях на опытных отсыпках и выбираться путем технико-экономического сравнения вариантов;

– для экранов и понуров плотин III и IV классов допускается применять торф, причем необходимо предусматривать защитное покрытие из минеральных грунтов.

Песчаные грунты следует применять для однородных плотин, если обеспечивается фильтрационная прочность грунтов плотины, а величина фильтрационного расхода воды через тело допустима по результатам водохозяйственных энергоэкономических расчетов.

Песчаные и крупнообломочные грунты допускается применять без ограничений для низовых призм земляных насыпных плотин при обеспечении сопряжения их с центральной или верховой противофильтрационной призмой, а также с основанием.

2.7.2. Зерновой состав карьерных грунтов следует считать основной характеристикой для оценки технической возможности возведения намывных плотин и экономической целесообразности выбранной конструкции.

Содержание органических и водорастворимых примесей в грунтах для намыва плотины следует допускать в количествах, при которых их остаток в теле намывной плотины после производства работ по ее намыву не выше величин, указанных в п. 2.7.1.

Предварительную оценку пригодности карьерного грунта для намыва плотин в зависимости от зернового состава следует производить по графикам (рис. 2.4.). Предпочтительными для намыва однородных плотин являются песчаные грунты I группы, песчаные и гравийные грунты II группы целесообразно предусматривать для неоднородных плотин с мелкопесчаной центральной зоной или глинистым ядром.

Супеси (III группа), суглинки (IV группа), гравийные и галечниковые грунты (V группа), а также лессовидные грунты могут использоваться для намыва при соответствующем технико-экономическом обосновании. При этом супеси и лессовидные суглинки следует использовать для намыва однородных плотин, а также для намыва центральной слабопроницаемой зоны неоднородных плотин, гравийно–галечниковые грунты для намыва боковых зон этих плотин.

Запас грунта в карьере должен быть в 1,5–1,8 раза больше, чем объем грунта, принятый в проекте плотины.

Грунт для намыва плотин должен быть проверен на содержание негабаритных включений (валунов, камней и т.п.), не проходящих через рабочие органы грунтовых насосов.

Для неоднородных плотин предпочтительны грунты с высокой степенью разнотернистости, например, гравийные с пылеватыми, глинистыми фракциями и при содержании песчаных частиц не менее 25–30%. Содержание в ядре глинистых частиц размером $d < 0,005$ мм допускается не более 20% по условиям консолидации грунта, более высокое содержание глинистых частиц следует допускать при специальном обосновании.

Возможность применения для намыва искусственных смесей грунтов из разных карьеров или сортированных карьерных грунтов должна быть обоснована технико-экономическим расчетом.

При необходимости следует предусматривать дополнительное искусственное уплотнение намытого песка (глубинное гидровибрирование, уплотнение взрывами, послойное вибрационное уплотнение или укатку и др.).

2.7.3. Пригодность материала для возведения каменно-земляных и каменнонабросных плотин должна быть обоснована данными соответствующих исследований в лабораторных и натурных условиях.

Пригодность скальных пород карьера (по прочности, морозостойкости, химическим свойствам) следует устанавливать в зависимости от высоты плотины, месторасположения их в профиле плотины и от климатических условий района строительства, учитывая условия разработки и транспортирования.

Состав каменного материала плотин следует подбирать исходя из:

- обеспечения требуемой плотности укладки,
- учета сегрегации при отсыпке высокими ярусами,
- учета местоположения грунтов в теле плотины.

При соответствующем обосновании допускается применение слабых выветрелых пород с учетом изменения их характеристик во времени.

Окончательный состав материала каменно-земляных и каменнонабросных плотин необходимо принимать на основе технико-экономических расчетов рассматриваемых вариантов плотин.

Предельный размер крупнообломочного грунта и его зерновой состав следует устанавливать в проекте в зависимости от качества камня и метода возведения плотины. Крупность материала, отсыпаемого послойной укаткой, должна быть не более 0,75 толщины отсыпаемого слоя.

Для плотин I и II классов высотой более 50 м лабораторные данные физико-механических характеристик грунтов следует уточнять исследованиями на опытных насыпях, для плотин более 100 м такие испытания обязательны.

Для наброски следует использовать камень без сортировки.

Укладку различного материала по частям профиля плотины следует предусматривать при высоте плотины 50 м и более, при этом прочный материал следует использовать в более напряженных частях, а материал морозостойких пород – во внешних частях профиля.

Для материала, предназначенного к укладке в тело плотины ниже поверхности воды или подверженного ее воздействию, коэффициент размягчаемости должен быть не ниже 0,9 для изверженных и метаморфических пород и 0,8 для осадочных. Меньшие значения коэффициента размягчаемости можно принимать при соответствующем обосновании.

К грунтам противofильтрационных устройств (экранов, понуров, ядер, слабоводопроницаемых призм), переходных слоев и обратных фильтров каменно-земляных плотин предъявляют те же требования, что и к соответствующим элементам земляных насыпных плотин.

Если противofильтрационное устройство возводят средствами гидромеханизации, необходимо, чтобы грунт удовлетворял требованиям, предъявляемым к грунтам намывных плотин.

Для переходных слоев и обратных фильтров каменноземляных плотин следует использовать карьерные разнoзернистые грунты.

Применение для этих целей обогащенных грунтов, полученных путем сортировки, промывки, добавления или смешивания различных фракций, следует допускать только при соответствующем технико-экономическом обосновании. Во всех случаях надлежит отдавать предпочтение однослойным переходным слоям и обратным фильтрам.

Природные каменные материалы в строительстве используют после механической обработки – расколки и обтески, распиловки, шлифования и полирования, дробления и отсева. Все каменные материалы, используемые в строительстве, можно разделить на две основные группы:

- материалы, применяемые в первоначальном виде;
- материалы, пригодные для строительных целей лишь после соответствующей обработки.

Рассмотрим основные каменные материалы, применяемые без обработки.

Бутовый камень – крупные куски неправильной формы размером 150–500 мм, массой 20–40 кг, получаемые при разработке известняков, доломитов и песчаников. Камень, получаемый при взрывных работах, носит общее название рваного камня. Бутовый камень должен быть однородным, без следов выветривания, расслоения и трещин, не должен содержать

рыхлых и глинистых включений. Предел прочности при сжатии камня из осадочных пород не менее 10 МПа, коэффициент размягчения не ниже 0,75, морозостойкость не менее 15 циклов. Бутовый камень широко применяют для бутовой и бутобетонной кладки фундаментов, подземных стен и стен неотапливаемых зданий, подпорных стен, ледорезов, отстойников и резервуаров.

Для кладки лучшим считается бутовый камень в виде плит неправильной формы так называемый плитняк. Его получают выколкой из осадочных и метаморфических пород, имеющих слоистое или сланцевое строение.

Валунный камень – крупные обломки (более 300 мм) горных пород ледникового происхождения, характеризующиеся окатанной, часто сильно выветрившейся поверхностью. Этот камень весьма разнообразен по петрографическому составу. Используют его для получения булыжного камня и щебня

Булыжный камень – зерна горной породы размером до 300 мм. Применяют его для покрытия мостовых, дворов и откосов, для каменной наброски при строительстве дамб. Крупный булыжный камень можно применять как бут, мелкий камень перерабатывают на щебень.

Гравий – рыхлое скопление различно обкатанных обломков горных пород. Размер отдельных зерен 5–70 мм. В зависимости от линейного размера частиц гравий подразделяют на фракции 5–10, 10–20, 20–40, 40–70 мм. Гравий используют в строительстве в качестве крупного заполнителя в цементных и асфальтовых бетонах, а также как фильтрующий материал в водопроводных сооружениях.

Песок – рыхлая горная порода, состоящая из зерен минералов и пород размером 0,14–5 мм. В зависимости от минералогического состава различают пески кварцевые, полевошпатные и карбонатные.

Пески как строительный материал широко применяют в связи с большим развитием цементной промышленности: большинство цементных растворов и бетонов содержат песок. От качества песка, применяемого как заполнитель, зависит прочность многих строительных материалов. Кварцевые пески – основное сырье для стекольной промышленности.

Наиболее часто в строительстве применяют каменные материалы, пригодные для строительства лишь после специальной обработки.

Плиты тесаные и пиленые изготавливают из блоков, отделенных от массива пород.

Процесс изготовления тесаных плит состоит из развалки монолитов, грубой околки, полустой и чистой тески.

Процесс изготовления пиленых плит значительно проще и состоит из распиловки блоков из природного камня и обработки лицевой стороны плиты для получения определенной фактуры.

Основным назначением тесаных и пиленых плит является облицовка зданий, поэтому на эти изделия используют однородные по строению горные породы, обладающие достаточной прочностью, устойчивостью к выветриванию и хорошей обрабатываемостью. Не допускаются трещины и содержание глинистых и других примесей.

Кровельные плитки получают раскалыванием и обрезкой глинистого (кровельного) сланца. Плитки выпускают размером от 250х150 до 600х350 мм при толщине 4–8 мм. Прочность при изгибе не должна быть ниже 15 МПа, они должны выдерживать не менее 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Плитки являются самым долговечным кровельным материалом, срок службы которого исчисляется сотнями лет.

Бортовые камни изготавливают обколкой и обтеской каменных пород. Выпускают камни трех основных видов: прямой, лекальный и для оформления съездов. Длина камней 70–200 см. по высоте они имеют два размера – низкие – 30 и высокие – 40 см при ширине верхней части 10,15,20 см.

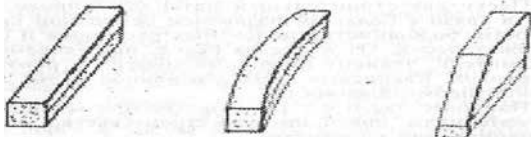


Рис. 2.5. Бортовые камни

а) прямой, б) лекальный, в) для оформления съездов

Верхнюю часть бортового камня, выступающую над дорожным покрытием, обтесывают чисто, а нижнюю – грубо.

Брусчатка – колотые и тесаные бруски камня, по форме приближающиеся к параллелепипеду, с наружной стороны в форме прямоугольника. По высоте брусчатку делят на низкую – 10 см, среднюю – 11–13 см, высокую 14–16 см. Ширина брусчатки всех сортов 12–15 см и длина 15–25 см. Верхняя и нижняя плоскости брусчатки, т.е. «лицо» и «постель», параллельны, а боковые грани суживаются к низу, так что длина и ширина граней постели меньше, чем грани лица на 5 мм у низкой брусчатки и на 10 мм у средней и высокой. Брусчатку изготавливают из однородных морозостойких каменных пород, имеющих прочность на сжатие не ниже 100 МПа и обладающих хорошей обрабатываемостью.

Щебень представляет собой смесь угловатых обломков камня различной конфигурации размером 5–150 мм. Изготавливают щебень из горных пород различного качества, что определяет его марку. Качество щебня устанавливают по пределу прочности при сжатии исходной горной породы в насыщенном водой состоянии, а также по показателям ее истираемости и сопротивления удару. По пределу прочности при сжатии (кгс/см²) щебень из изверженных горных пород подразделяют на марки: 1200, 1000 и 800, из метаморфических горных пород – 1200, 1000, 800 и 600, из осадочных горных пород – 1200, 1000, 800, 600, 400, 300 и 200. Он должен состоять из однородных по качеству обломков породы, приближающихся по форме к кубу или тетраэдру, с содержанием вытянутых и плоских щебенков не более 25 %.

Получают щебень дроблением камня в дробилках разных конструкций, а мелкий щебень (с размерами кусков менее 25 мм) – на молотковых или валковых дробилках. Щебень широко применяют в строительстве для приготовления цементнобетонных и асфальтобетонных смесей.

2.8. Материалы для строительства грунтовых плотин на вечной мерзлоте

Вечномерзлыми грунтами называются грунты, находящиеся в мерзлом состоянии в продолжении многих (от трех и более) лет.

Мерзлыми грунтами называются грунты, которые имеют отрицательную или нулевую температуру и содержат в своем составе лед.

Мерзлые грунты по состоянию подразделяются на:

– твердомерзлые – прочно сцементированные льдом и практически несжимаемые под нагрузками от сооружений, характеризующиеся относительно хрупким разрушением. К твердомерзлым относятся песчаные и глинистые грунты, если их температура ниже:

для песков пылеватых -0,3 °С.

для супесей -0,6 °С.

для суглинков -1,0 °С,

для глины -1,5 °С;

– пластичномерзлые – сцементированные льдом, но обладающие вязкими свойствами (вследствие содержания в них значительного количества незамерзшей воды), характеризующиеся способностью сжиматься под нагрузками от сооружения. К пластичномерзлым относятся песчаные и глинистые грунты со степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой $G < 0,8$, если их температура отрицательная, но выше значений, указанных для твердомерзлых грунтов;

– сыпучемерзлые – несцементированные льдом вследствие малой влажности песчаные и крупнообломочные грунты.

Криогенной текстурой называется сложение мерзлого грунта, обусловленное замерзанием содержащейся в нем воды и характеризующееся формой, величиной и расположением включений льда.

Лед в мерзлом грунте подразделяют на:

- поровый лед (лед-цемент), который находится в порах грунта и цементирует его частицы или их агрегаты;
- ледяные включения – прослойки, линзы и другие формы льда.

В зависимости от толщины ледяные включения подразделяются на тонкие (менее 2 мм), средние (от 2 до 20 мм) и толстые (более 20 мм).

Прослойки и линзы льда толщиной более 30 см в зависимости от характера залегания называются пластом или жилой, эти образования рассматриваются как элементы сложения массива мерзлого грунта и в понятие «криогенная текстура» не входят.

Различается массивная, слоистая и сетчатая текстура мерзлого грунта.

Массивная текстура характеризуется наличием и равномерным распределением в основном порового льда, а льдистость за счет ледяных включений не превышает 3 % общего объема мерзлого грунта.

Слоистая текстура характеризуется наличием ледяных включений в виде прослоек и линз, чередующихся с минеральными слоями, имеющими массивную текстуру. Ледяные включения могут быть расположены горизонтально, косо, вертикально и распределены равномерно или неравномерно.

Сетчатая текстура характеризуется расположением ледяных включений в виде сетки. Ледяная сетка может быть правильной, завершенной или неправильной, незавершенной.

Талик – участок горной породы с положительной температурой, сухой или заключающий в себе капельно-жидкую воду, расположенный в массиве вечномерзлого грунта.

Сквозной талик – талик, сливающийся с талыми грунтами, подстилающими толщу вечномерзлых грунтов.

2.8.1. Общие сведения

Мерзлотные процессы:

- пучение грунтов – неравномерное увеличение их объема при промерзании, происходящее как за счет увеличения объема имевшейся в грунте воды при ее кристаллизации, так и вследствие замерзания воды, мигрирующей извне к фронту промерзания;
- наледь (речная) – горизонтальные слои льда, образовавшиеся при замерзании воды, выливавшейся под напором на поверхность речного льда и прилегающей части долины, вследствие перемерзания русла реки;
- термокарст – образование провальных форм рельефа вследствие оттаивания льдистых вечномерзлых грунтов или подземного льда;
- солифлюкция – течение грунта по склону, вызванное процессом сезонного промерзания – оттаивания.

Талая плотина – плотина, водоупорность которой обеспечивается наличием слабопроницаемых противодиффузионных устройств в ее теле и основании. При строительстве и эксплуатации талой плотины допускается оттаивание вечномерзлых грунтов основания и фильтрация через тело и основание плотин.

Мерзлая плотина – плотина, водонепроницаемость которой обеспечивается мерзлым состоянием грунтов ее тела и основания.

При эксплуатации плотины фильтрация воды через ее тело и основание, а также оттаивание основания под большей частью противодиффузионного устройства не допускается.

2.8.2. Материалы, применяемые для строительства плотин

Плотины из грунтовых материалов, возводимые в северной строительно-климатической зоне, в зависимости от грунта и их противофильтрационных устройств, способов возведения подразделяются на следующие типы:

Таблица 2.9

Типы плотин из грунтовых материалов

Типы плотин	Материалы		Способы воздействия плотин
	Тела плотин	Противофильтрационных устройств	
Земляные, насыпные, талые	Песчаные, крупноблочные, глинистые грунты (для однородных плотин)	Глинистые грунты, негрунтовые материалы и мелкозернистые пески (для однородных плотин)	Послойной отсыпкой грунтов насухо или отсыпкой в воду
Земляные, насыпные, мерзлые	То же	Глинистые грунты и мелкозернистые пески	Послойной отсыпкой грунтов насухо с последующим промораживанием тела и основания плотины с помощью замораживающих системами устройств, или за счет естественного холода
Каменно-земляные, талые	Камень и крупноблочные грунты	Глинистые грунты	Послойной отсыпкой насухо грунтов и камня, отсыпкой в воду грунтов противофильтрационного элемента
Каменно-набросные, талые	Камень	Негрунтовые материалы: (бетон, железобетон, асфальтобетон, синтетическая пленка металл, дерево)	Отсыпкой камня с уплотнением механическими средствами или без уплотнения

2.8.2.1. Земляные насыпные плотины

Земляные насыпные плотины по конструкции тела, противофильтрационного устройства и способу возведения подразделяются на следующие основные виды.

Таблица 2.10

Основные виды земляных насыпных плотин

Отличительные признаки плотин	Виды плотин	
	талые	мерзлые
1	2	3
По конструкции тела плотин	Из однородного грунта. Из неоднородного грунта. С экраном из негрунтовых материалов. С экраном из грунта. С ядром из грунта. С диафрагмой (стенкой, шпунтом)	Из однородного грунта. С ядром из грунта. С центральной противофильтрационной призмой.
По конструкции противофильтрационных устройств в основании плотины (рис. 2.8.)	С понуром. С зубом. С инъекционной завесой. С диафрагмой (стенкой, шпунтом).	С ледогрунтовой стенкой. С зубом.

1	2	3
По способу возведения плотины	С механическим уплотнением грунта. Без механического уплотнения грунта (отсыпкой в воду).	Послойная отсыпка грунтов насухо с механическим уплотнением и последующим промораживанием грунтов основания и тела плотин с помощью замораживающих систем или устройств. Послойная отсыпка в воду с последующим промораживанием грунтов основания и тела плотины с помощью охлаждающих систем или устройств. Отсыпка грунта в зимнее время насухо слоями небольшой мощности с последующим механическим уплотнением и промораживанием за счет естественного холода.

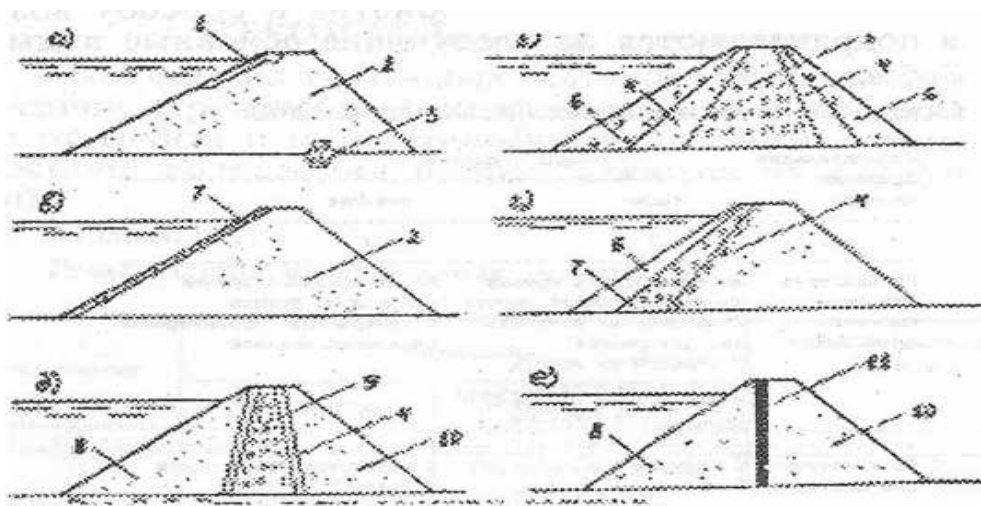


Рис. 2.6. Виды талых земляных плотин (по конструкции тела плотины)

а – из однородного грунта; б – из неоднородного грунта; в-с экраном; г – с экраном из грунта; д – с ядром; е – с диафрагмой (стенкой, шпунтом); 1 – крепление откоса, 2 – тело плотины, 3 – дренажный банкет, 4 – переходные зоны, 5 – центральная призма, 6 – защитный слой, 7 – экран, 8 – верхняя призма, 9 – ядро, 10 – низовая призма, 11 – диафрагма

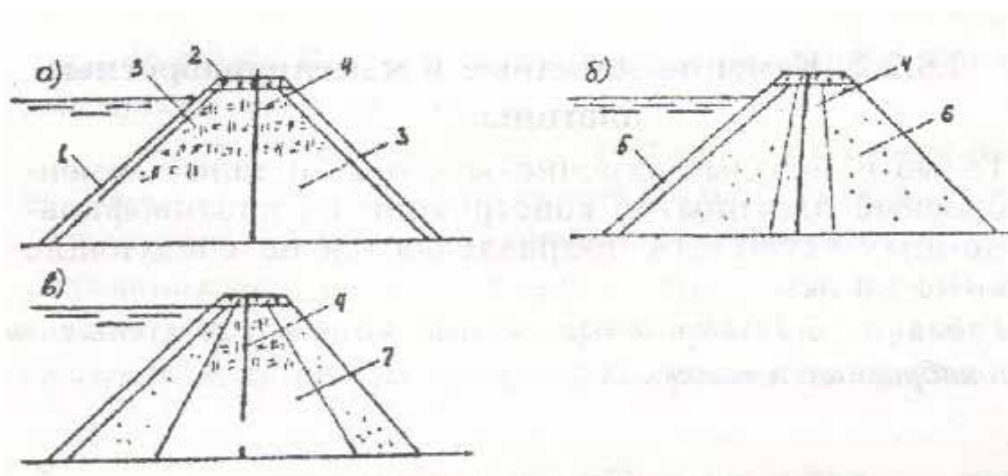


Рис. 2.7. Виды мерзлых земляных насыпных плотин (по конструкции тела плотины)

а) – из неоднородного грунта; б) – с ядром; в) – с центральной призмой; 1 – крепление откоса, 2 – теплоизоляционный слой, 3 – тело плотины, 4 – замораживающая система, 5 – вертикальная призма, 6 – низовая призма, 7 – центральная призма

Послойная отсыпка в воду с последующим промораживанием грунтов основания и тела плотины с помощью охлаждающих систем или устройств.

Отсыпка грунта в зимнее время насухо слоями небольшой мощности с последующим механическим уплотнением и промораживанием за счет естественного холода.

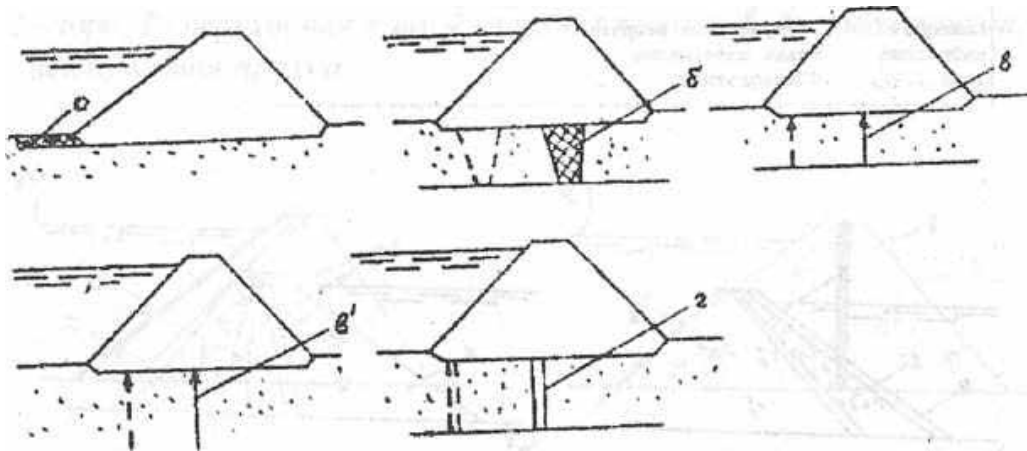


Рис. 2.8. Конструкции противофильтрационных устройств в основании:

для талых плотин: а) – понур, б) – зуб, в) – инъекционная завеса, д) – диафрагма (стенка); для мерзлых плотин: б) – зуб, промораживаемый за счет естественного холода, в) ледогрунтовая стенка.

2.8.2.2. Каменно-земляные и каменнонабросные плотины.

Талые и мерзлые каменно-земляные и талые каменнонабросные плотины по конструкции их противофильтрационных устройств подразделяются на следующие основные виды

Таблица 2.11

Основные виды каменно-земляных и каменнонабросных плотин

Плотины	Виды плотин по конструкциям противофильтрационных устройств	
	талые	мерзлые
Каменно-земляные (рис. 2.4.-2.9)	С грунтовым экраном С ядром С верховой грунтовой призмой С центральной грунтовой призмой	С грунтовым ядром С центральной грунтовой призмой С верховой грунтовой призмой, ядром и низовым клином из каменной наброски. Диаметр пор наброски должен обеспечить достаточное охлаждающее влияние низовой призмы на низовую грань ядра плотины за счет естественной конвекции воздуха.
Каменно-набросные (рис. 2.2.)	С экраном из негрунтовых материалов С диафрагмой	

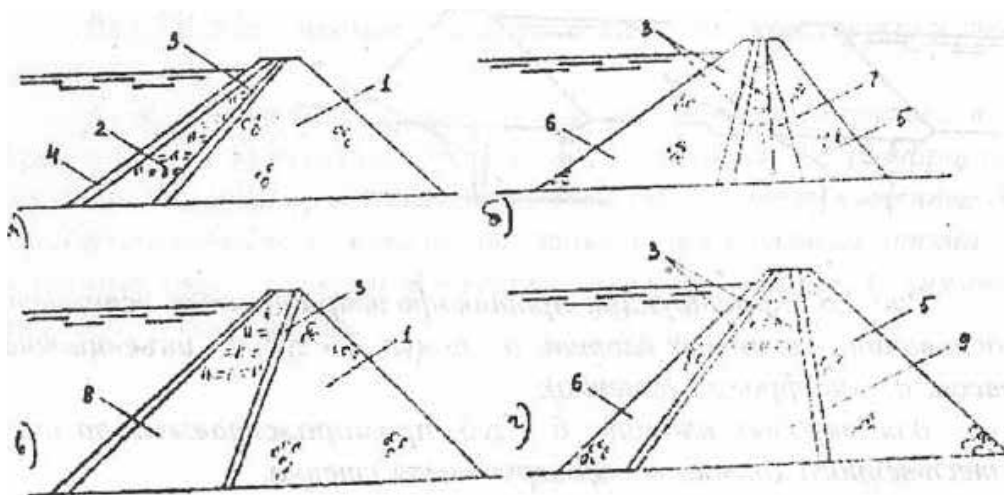


Рис. 2.9. Виды талых каменно-земляных плотин (по конструкции тела плотин):

а – с грунтовым экраном; о – с ядром; в – с верховой грунтовой призмой; г – с центральной грунтовой призмой; 1 – упорная призма; 2 – грунтовой экран; 3 – переходная зона (обратный фильтр); 4 – защитный слой; 5 – низовая призма; 6 – верховая призма; 7 – ядро; 8 – верховая грунтовая противофильтрационная призма; 9 – центральная грунтовая противофильтрационная призма.

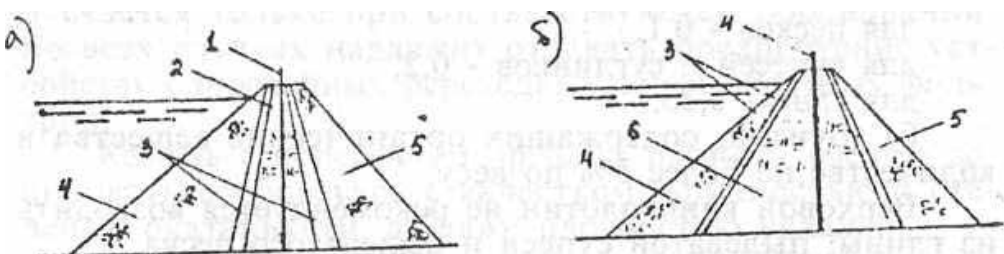


Рис. 2.10. Виды мерзлых каменно-земляных плотин (по конструкции тела плотины)

а – с ядром; б – с центральной призмой; 1 – замерзаемая система, 2 – ядро. 3 – переходная зона, 4 – верхняя призма, 5 – низовая призма, б – центральная призма.

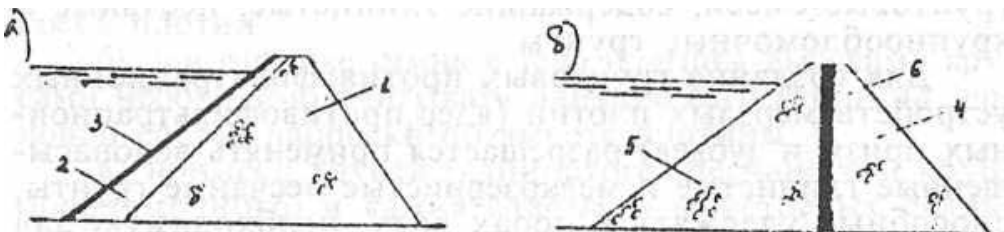


Рис. 2.11. Виды каменнабросных плотин

а – с экраном из негрунтовых материалов; б - с диафрагмой: 1 – упорная призма, 2 – подэкрановая кладка (выравнивающий слой), 3 – экран, 4 – низовая призма, 5 – верхняя призма, б – диафрагма.

2.8.3. Основные требования к материалам

2.8.3.1. Для возведения тела талых (за исключением их противофильтрационных устройств) и верхового клина мерзлых плотин допускается предусматривать крупнообломочные, песчаные и глинистые грунты за исключением:

а) засоленных грунтов, содержащих включения водорастворимых солей в количестве, превышающем следующие значения (в процентах к весу скелета грунта):

для песков – 0,1,

для супесей и суглинков – 0,2.

для глин – 0,25,

б) грунтов, содержащих органические вещества в количестве не более 5 % по весу.

Верховой клин плотин не рекомендуется возводить из глины, пылеватой супеси и пылеватого песка.

Для создания грунтовых противофильтрационных устройств талых плотин (экранов, ядер, противофильтрационных призм, понуров, зубьев) рекомендуется применять глинистые грунты (суглинки и супеси) с коэффициентом фильтрации не более 10 см/сек, имеющие естественную влажность, равную или большую влажности на границе раскатывания, но меньшую влажности на границе текучести.

Кроме того, допускается применять искусственные грунтовые смеси, содержащие глинистые, песчаные и крупнообломочные грунты.

Для создания грунтовых противофильтрационных устройств мерзлых плотин (ядер, противофильтрационных призм и зубьев) разрешается применять водонасыщенные глинистые и мелкозернистые песчаные грунты, способные удержать в порах воду, необходимую для образования водонепроницаемой ледогрунтовой стенки.

Для обратных фильтров, дренажей, переходных зон и креплений откосов допускается применять песчаные и крупнообломочные грунты (за исключением пылеватого песка), а также каменную наброску, которая должна обладать достаточной прочностью, морозостойкостью и водостойкостью.

Крупнообломочные и песчаные грунты (за исключением пылеватого песка) допускается применять без ограничений для низовых и верховых частей профиля земляных плотин (при соответствующем сопряжении их с противофильтрационными устройствами).

2.8.3.2. Для устройства переходных зон и обратных фильтров талых каменно-земляных плотин рекомендуется предусматривать карьерные разнородные грунты.

Возможность применения для этих целей обогащенных грунтов, полученных путем сортировки, промывки, добавления или смешивания различных фракций, допускается только при соответствующем обосновании. Во всех случаях надлежит отдавать предпочтение устройству однослойных переходных зон и обратных фильтров.

Камень в поперечном профиле плотины следует зонировать сообразуясь с качеством, крупностью и степенью окатанности, а также плотностью укладки.

Более прочный камень следует использовать для укладки в напряженные зоны профиля плотины, в зону переменного горизонта воды и зону сезонного оттаивания и промораживания. Камень недостаточно морозостойких пород и существенно снижающий прочность при намокании надлежит укладывать во внутренние зоны профиля плотины.

Отсыпку каменной наброски в тело плотины необходимо проектировать с учетом следующих требований:

а) наиболее крупные камни следует отсыпать у откосов плотин;

б) при отсыпке камня в тело плотины высокими ярусами необходимо учитывать влияние сегрегации на зерновой состав наброски по высоте плотины;

в) примеси грунта (глинистого, песчаного и крупнообломочного) и камня слабых и ветрелых скальных пород допустимы в количестве не более 10 % по весу.

Для камня, предназначенного к укладке в плотину ниже поверхности воды или подверженного переменному ее воздействию, коэффициент размягчения должен быть не ниже:

– для изверженных метаморфических пород – 0,9,

– для осадочных – 0,8.

В зону переменного горизонта воды и зону сезонного оттаивания – промерзания должен укладываться прочный камень с маркой морозостойкости не менее Мрз-100.

2.8.4. Мёрзлые плотины

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛОТИН МЕРЗЛОГО ТИПА

Нефильтрующие мерзлые плотины позволяют максимально использовать мерзлотно-грунтовые и климатические особенности районов Крайнего Севера, в частности, достаточно высокую несущую способность мерзлых грунтов и их водоупорные свойства. Эксплуатация водохранилищ возможна без потерь воды на фильтрацию, что особенно важно при строительстве плотин на сильнофильтрующих при оттаивании грунтов в районах с низким модулем поверхностного стока, в частности, на мелких перемерзающих водотоках.

Основными конструктивными элементами, определяющими прочность и водонепроницаемость мерзлой плотины, является искусственно промороженные или сохраняемые в естественном состоянии мерзлые водонепроницаемые грунты, поры которых заполнены льдом. Зона постоянно мерзлого грунта занимает среднюю и низовую части плотины, а зона постоянно талого грунта – верховую часть. Водонепроницаемой преградой и упором, воспринимающими давление воды, служат мерзлая низовая часть и ядро плотины. Применение противофильтрационных экранов, располагаемых в теле талого верхового клина или по верховому откосу, нецелесообразно, так как деформации верхового клина могут быть причиной опасных деформаций экрана. Верховую призму следует рассматривать как теплоизоляцию, предохраняющую центральную мерзлую зону от оттаивания.

Мерзлое водонепроницаемое тело плотины может быть создано различными способами:

а) искусственным промораживанием центральной части (ядра) и подруслового талика после возведения плотины на полную высоту перед заполнением водохранилища или в первые годы его эксплуатации с помощью принудительного охлаждения воздушной замораживающей системой или термосваями;

б) послойным промораживанием талого грунта, укладываемого в период низких отрицательных температур воздуха или уложенного в теплое время, но промораживаемого в зимний период;

в) комбинированным способом – послойным промораживанием тела плотины после предварительного искусственного промораживания таликов;

г) промораживанием низового клина плотины в зимнее время с помощью естественной вентиляции пространства под навесом на низовом откосе, а также в сочетании с промораживанием ядра при помощи морозильной системы, на летний период вентиляционные ходы должны быть перекрыты;

д) путем естественного промерзания плотины из талых грунтов под действием отрицательных среднегодовых температур наружного воздуха и вечной мерзлоты основания при достаточной водоупорности противофильтрационного элемента.

Каждому из этих способов создания мерзлого тела плотины должны отвечать свои конструктивные особенности.

Наиболее распространенным в настоящее время является способ промораживания центральных зон плотин в зимнее время с помощью воздушных замораживающих систем. Он является достаточно производительным и простым в устройстве и эксплуатации.

Постоянно действующая замораживающая установка с принудительной циркуляцией жидкого хладоносителя (рассола) по трубам замораживающих колонок является достаточно надежным способом промораживания плотин.

При проектировании следует учитывать, что она является сложной по устройству, требует тщательной профилактики, чтобы не допустить утечки рассола, попадание которого в грунт делает невозможным его замораживание.

Применение термосвай рекомендуется только после опытной проверки в натурных условиях холодопроизводительности и параметров мерзлого грунтового цилиндра (радиус, температура, скорость промерзания).

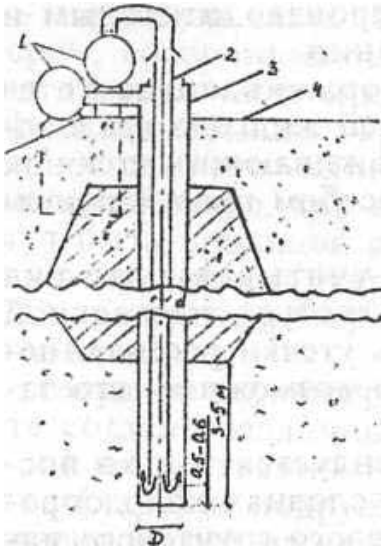


Рис. 2.12. Схема воздушной замораживающей системы:

1 – воздуховоды; 2 – внутренняя труба колонки; 3 – внешняя труба колонки; 4 – гребень плотины

При возведении мерзлой плотины с послойным естественным промораживанием до значений температур в центральной части профиля, близких к расчетным предельным, оттаивание верхового клина не распространяется за пределы вертикали, проведенной из точки уреза воды на профиле верхового откоса из слабофильтрующего грунта. Эту вертикаль можно принять за условную границу талой и мерзлой зон профиля промороженной плотины при среднегодовой температуре наружного воздуха, не превышающую -8°C . и температуре воды не выше $+4^{\circ}\text{C}$.

Наибольшую эффективность воздушных морозильных систем могут обеспечить следующие конструктивные особенности:

диаметр внутренней трубы колонки должен быть вдвое меньше внутреннего диаметра внешней трубы, небольшие отклонения допустимы лишь в сторону уменьшения диаметра внутренней трубы:

$$\frac{D_{\text{нар}}}{d_{\text{внутр}}} = 2-3$$

– внутренняя труба должна подвешиваться на фланце на край внешней трубы колонки с зазором не менее 50 см над дном герметичной внешней трубы;

– вход и выход воздуха из колонок должен осуществляться по подводящему и отводящему воздуховодам;

– внутренняя труба и межтрубное пространство должны герметично соединяться с воздухопроводами гибкими патрубками;

входное и выпускное отверстия воздухопроводов должна оборудоваться клапанами, прекращающими доступ воздуха в систему сразу после выключения вентилятора;

– для консервации, воздушной морозильной системы в теплое время года следует предусмотреть герметизацию воздухопроводов и патрубков отключаемых колонок металлическими заглушками на мягких уплотнителях;

– каждую воздушную систему следует оборудовать автоматическим выключателем при превышении температуры наружного воздуха температуры поверхности внешней трубы колонки;

– при ручном управлении охлаждающей системой подачу воздуха следует производить при его температуре ниже -10°C ;

– для уменьшения нагревания наружных элементов воздушной системы солнечными лучами оголовки морозильных колонок и воздуховоды должны окрашиваться в белый цвет или затеняться навесами, покрываться теплоизолирующей обмоткой;

– на случай недостаточного охлаждающего действия системы на отдельных участках плотины со сложным геологическим строением основания следует предусмотреть возможность установки и подключения к воздуховодам дополнительных колонок в период эксплуатации;

– для компенсации обрастания морозильных колонок инеем мощность вентиляторов должна не менее чем вдвое превышать расчетную величину мощности, определенную для нормальных условий эксплуатации;

– в районах с сильными зимними ветрами входное отверстие распределительного воздухопровода следует оборудовать легким фильтром и пространственным лабиринтом, доступным для регулярной очистки его от снежной пыли, которая проникла через фильтр;

– вентилятор может быть установлен как на выпускном отверстии отводящего воздуховода, так и на входном подводящего, выбор режима работы вентилятора (нагнетание или всасывание) осуществляется расчетом на наибольшую холодопроизводительность системы;

– нагнетание холодного наружного воздуха в замораживающую колонку рекомендуется осуществлять по внутренней трубе, а отвод – по кольцевому зазору между внешней и внутренней трубами колонки, если наибольшей льдистостью обладают грунты основания. Если наибольшая льдистость в грунте ядра плотины, то нагнетать лучше по межтрубному пространству с выходом по внутренней трубе;

– внешнюю трубу колонки рекомендуется выполнять из стальных или алюминиевых труб, внутреннюю – из пластмассовых или фанерных (для уменьшения теплообмена между восходящими и нисходящими потоками воздуха и для максимальной холодоотдачи от колонки в грунт), при этом необходимо учитывать принятый способ прогрева колонок при ликвидации ледяных пробок;

– рекомендуется устройство термоизоляционной обсыпки вокруг замораживающих колонок (шлак, опилки) в пределах сезонно оттаивающего слоя грунта на гребне плотины, для уменьшения прогрева и оттаивания грунта на контакте с прогревающимся летом металлом;

– каждая колонка должна оборудоваться люком для ввода приборов, изменяющих скорость потока и температуру воздуха.

2.8.5. Требования к конструкциям плотин мёрзлого типа

Центральную часть мерзлых плотин рекомендуется возводить из плотно уложенного талого связного грунта (суглинка или супеси), способного удерживать в порах воду, необходимую для образования водонепроницаемого льдогрунтового ядра.

Для усиления теплоизолирующего влияния верховой призмы мерзлое ядро плотины рекомендуется располагать на достаточном удалении от верхнего бьефа. Для увеличения объема (толщины) верховой призмы следует устраивать широкие бермы или уполаживать верховой откос. Уширением верховой призмы обеспечивается и устойчивость плотины при неизбежном оттаивании термопросадочного основания под верховым клином.

Естественные талики под средней частью профиля мерзлой плотины и низовой упорной призмой должны быть предварительно, до заполнения водохранилища, проморожены. Талик под верховой призмой, учитывая его неизбежное оттаивание в период эксплуатации, желательно сохранить.

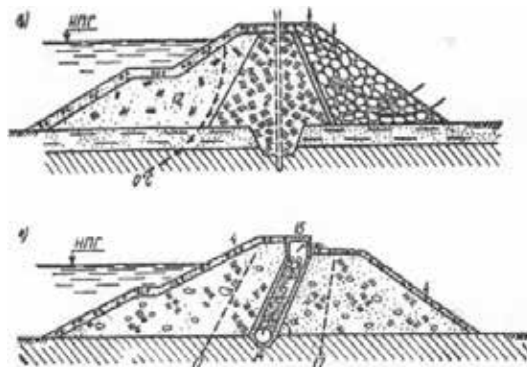


Рис. 2.13. Рекомендуемые конструкции схемы мерзлых плотин

а – однородная плотина из связного грунта, отсыпаемого в талом состоянии, без включений торфа и мерзлых комьев; б – плотина с мерзлым ядром из связного грунта с верховой и низовой упорными призмами из любых талых грунтов; в – то же, с включениями мерзлых комьев в теле верхнего клина; г – каменно-земляная плотина с мерзлым ядром из связного грунта и верховой теплоизолирующей призмой; д – каменно-земляная плотина с мерзлым ядром из связного грунта, верховой призмой из любых местных грунтов и с низовой набросной призмой (стрелками показано направление естественной зимней конвекции воздуха в наброске); е – плотина с воздухопроницаемым охлаждающим слоем, стрелками показано направление принудительной фильтрации холодного зимнего воздуха в порах однородного крупнозернистого слоя: 1 – вечномерзлое основание (верхний слой просадочный льдонасыщенный грунт). 2 – мерзлое ядро из связного грунта. 3 – замерзающие колонки мерзлотной завесы (показаны условно). 4 – защитный слой из песка, песчано-гравелистого или древесно-щебенистого грунта. 5 – выравнивающий слой, снижающий естественную конвекцию в наброске. 6 – низовая упорная призма. 7 – верхняя упорная призма. 8 – включение мерзлых комьев. 9 – дренажирующая призма. II – низовая набросная призма. 12 – верховая призма. 13 – переходная зона. 14 – перфорированная труба (галерея, канал) для нагнетания холодного воздуха. 15 – сборный железобетонный коробчатый воздухосборник. 16 – крупнозернистый охлаждающий слой. 17 – границы зоны промораживания

В однородную плотину и в мерзлое ядро неоднородной плотины допускается укладывать мерзлый грунт в количестве до 15 %. В верховую призму допускается укладывать до 30 % мерзлых комьев и до 10 % торфа. При возможности оттаивания низового клина мерзлой плотины включения торфа и мерзлых комьев ограничиваются так же, как и для верховой призмы. При обеспечении внутренних зон от оттаивания как при возведении, так и во время эксплуатации мерзлой плотины содержание мерзлых комьев в низовом клине не ограничивается, торфа даже в мерзлом состоянии не допускается более 20 %.

Включения торфа и мерзлых комьев должны быть равномерно распределены по объему вмещающего их грунта, а не сосредоточены в отдельных местах и слоях.

Грунты, укладываемые в верховой клин мерзлой плотины, который в условиях эксплуатации будет талым, должны обладать достаточной сопротивляемостью сдвигу после оттаивания и консолидации, а деформируемость этих грунтов должна находиться в пределах, обеспечивающих монолитность талой части профиля плотины при оттаивании и просадках грунтов основания.

Для обеспечения водонепроницаемости мерзлых зон и термической устойчивости плотины средняя температура мерзлого ядра и охлаждаемых вечномерзлых грунтов основания и береговых примыканий к моменту заполнения водохранилища должна быть на 1,5 °C ниже температуры фазовых переходов влаги в этих грунтах.

Центральная замороженная зона мерзлой плотины должна быть полностью монолитной и водонепроницаемой, наличие в ней трещин и пустот, а также зон сыпуче-мерзлых грунтов с неполным заполнением пор текстурообразующим льдом недопустимо. Этим требованиям отвечает грунт с влажностью, близкой к 0,9 полной его влагоемкости W_p при проектной плотности укладки γ_{opt} .

Мерзлое ядро должно постоянно составлять сплошную противofильтрационную преграду, смыкающуюся с вечномерзлым основанием.

К моменту наполнения водохранилища и в первые годы эксплуатации размеры мерзлой зоны могут быть несколько меньше предельных при наличии системы принудительного охлаждения плотины, обеспечивающей ее полную водонепроницаемость.

Примыкание мерзлой плотины к бортам долины должно осуществляться так, чтобы мерзлая зона тела плотины смыкалась с вечномерзлыми грунтами бортов.

Вытаивание подземных льдов следует считать одной из главных причин разрушающей сосредоточенной фильтрации по термокарстовым полостям, и опасных деформаций мерзлых плотин. При проектировании и строительстве мерзлых плотин на рыхлых отложениях, вмещающих ледяные линзы и клиновидные льды, следует учитывать процессы вытаивания крупных ледяных включений в основании и в береговых примыканиях талого верхового клина плотины, а также в пределах теплового влияния водохранилища.

Сопряжение противofильтрационных элементов мерзлой плотины с высокольдистыми грунтами береговых склонов следует осуществлять путем врезки этих элементов до мало-просадочных водоупорных вечномерзлых пород.

Льдонасыщенные берега с крупными ледяными включениями в примыканиях к сооружениям напорного фронта могут быть защищены от оттаивания слоем водонепроницаемого грунта (или фильтрующего с пленочным экраном), прикрытого обратным фильтром и камнем или валунами от волнового воздействия водохранилища.

Для уменьшения осадок и деформаций верховой призмы мерзлой плотины высокольдистые отложения вблизи подошвы верхового откоса рекомендуется предварительно оттаивать или заменять талыми уплотненными грунтами в зоне расчетного оттаивания. Наиболее эффективной такая замена будет при сравнительно неглубоком (до 10 м) залегании кровли малопросадочных вечномерзлых пород.

Низовую призму мерзлой плотины допускается возводить на льдистых вечномерзлых грунтах основания без их специальной подготовки со снятием растительного слоя.

Заполненные водой понижения в нижнем бьефе вблизи подошвы низового откоса мерзлой плотины не допустимы. Появляющуюся здесь вследствие фильтрации из берегов или таяния снега и наледей воду необходимо удалять от подошвы плотины.

При проектировании мерзлой плотины следует учитывать, что в районах распространения клиновидных льдов и других форм подземного льда может происходить сквозное протаивание вечной мерзлоты под дном водохранилища.

Гребень, низовой откос и надводная часть верхового откоса мерзлой плотины подвержены попеременному замерзанию и оттаиванию. Для предотвращения пучения, морозобойного трещинообразования и солифлюкционных сплывов на низовом откосе слой сезонного промерзания и оттаивания должен отсыпаться из песчаных, гравелистых и щебенистых грунтах без пылеватых и глинистых примесей.

Крутизна верхового откоса мерзлой плотины должна назначаться в расчете на полную величину осадки основания верхового клина, то есть с запасом, обеспечивающим устойчивость верхового откоса в процессе и после оттаивания основания под верховым клином плотины от воздействия тепла водохранилища.

Принудительное охлаждение плотины системой воздушных замораживающих колонок следует предусматривать на период стабилизации расчетного температурного режима мерзлой части плотины, после чего должны быть предусмотрены возможности прекращения принудительного охлаждения и консервации замораживающей системы, обеспечивающей ее работоспособность в аварийных ситуациях.

При устройстве низовой упорной призмы из пористого крупнозернистого материала (каменной наброски, гальки и валунов) ядро мерзлой плотины должно отсыпаться из суглинка с содержанием пылеватых и глинистых частиц не менее 40 %.

2.8.5.1. Борьба с пучением и морозобойным трещинообразованием

При проектировании плотин в районах Крайнего Севера рекомендуется учитывать следующие опасные проявления морозного пучения:

- а) пучение связных грунтов при промерзании в ходе послойной зимней укладки;
- б) пучение в пределах сезоноттаивающего слоя на гребне и откосах плотины при многократном замерзании и оттаивании в период эксплуатации;
- в) пучение оснований при производстве работ по возведению плотины и в эксплуатационный период (у подошвы и примыканий плотины).

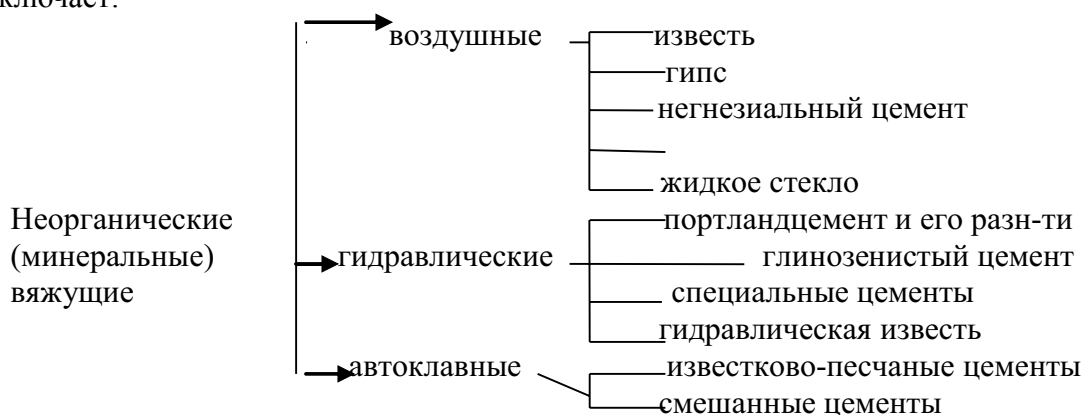
Эффективное снижение вредного влияния пучения при однократном промораживании талого связного грунта в процессе зимней укладки в тело плотины достигается переуплотнением грунта свыше максимальной стандартной плотности. При многократном промерзании – оттаивании за счет пучения происходит постепенное разуплотнение и переувлажнение грунта, снижающее его прочность и водоупорные свойства. Некоторое уменьшение пучения достигается при снижении начальной влажности до значений, близких к пределу раскатывания (W_p). Наличие крупнообломочных включений в количестве 50 % по весу снижает пучение в 1.5–2 раза, хотя оно и не обеспечивает долговечной противопучинной стабилизации грунта. Достаточно эффективным средством снижения пучения является пригрузка из непучинистого грунта толщиной до 2.5–3 м. В талых плотинах для предотвращения пучения в зоне сезонного промерзания-оттаивания может быть использовано засоление грунта на 2/3 глубины этой зоны солями NaCl, CaCl₂ и KCl. Противопучинное засоление является достаточно устойчивым мероприятием, срок действия которого измеряется не менее чем 40–50 циклами замерзания – оттаивания.

Морозобойные трещины образуются вследствие сильного охлаждения зимой поверхности мерзлого грунта. и образуют сетку, близкую к прямоугольной, с расстоянием между противоположными трещинами-сторонами в пределах 5–25 м. Блоки, ограниченные трещинами, обычно называют «полигонами». Глубина морозобойной трещины может составлять от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Возможность зарождения морозобойной трещины может составлять от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Возможность зарождения морозобойной трещины может быть предсказана по комплексу характеристик верхнего 1,5-метрового слоя грунта. Морозобойные трещины могут возникать в мелкозернистых песчаных и глинистых грунтах при определенной влажности. Если суммарная (льдистость + незамерзшая вода) влажность в поверхностном слое массива меньше утроенной влажности любого из 0,2-метровых слоев внутри верхнего 1,5-метрового слоя, то образование морозобойных трещин возможно только с поверхности. Если же влажность верхнего слоя больше утроенной влажности какой-либо из внутренних прослоек 1,5-метрового слоя грунта, то зарождение морозобойной трещины может произойти и внутри этого слоя. Отсыпка теплозащитного слоя толщиной 1,5 м и более из грунта с большим содержанием крупных частиц ($d > 2$ мм более 70 %), но не содержащим пылеватых частиц ($d < 0,05$ мм) и большего количества крупных пустот практически исключает возможность образования морозобойных трещин. Выполнение рекомендаций по защите плотин от пучения автоматически обеспечивает защиту их от образования морозобойных трещин.

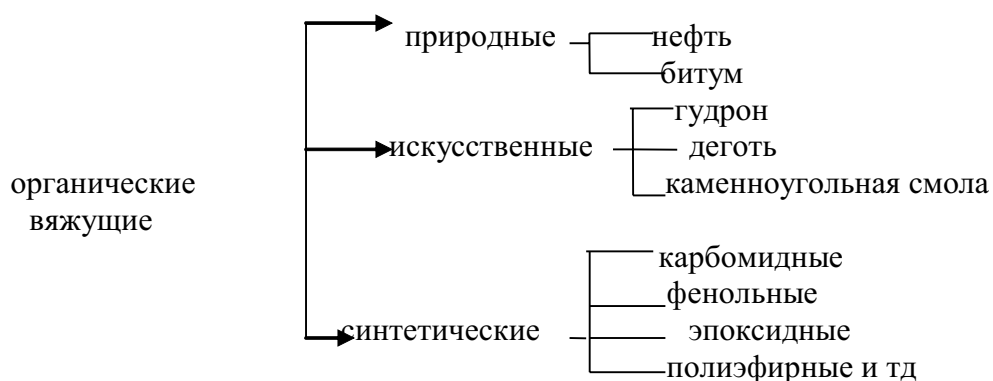
3. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

3.1. Классификация и характеристика минеральных вяжущих веществ

Вяжущие вещества – большая группа материалов, повсеместно применяемая во всех областях гидротехнического строительства. Разнообразие вяжущих веществ определяется сложностью их химического состава, химическими процессами, протекающими при их твердении. Общим для всех материалов является переход из пластичного, тестообразного состояния в твердое, в результате отдельные частицы песка, щебня, гравия омоноличиваются между собой. По природе вяжущие материалы делятся на неорганические и органические. Неорганические или минеральные вяжущие находятся в порошкообразном состоянии и при затворении водой и раствором солей, щелочей, кислот способны образовывать пластичное тесто, со временем переходящее в камнеобразное состояние. Группа неорганических вяжущих включает:



Группа органических вяжущих состоит

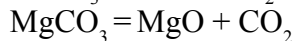
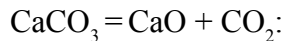


Органические вяжущие вещества являются гидрофобными, то есть не смачиваются водой, для работы они растворяются органическими жидкостями или разогреваются. В последнее время, в связи с интенсивным развитием химии полимеров, группы синтетических вяжущих интенсивно пополняются новыми соединениями, применяемыми в строительстве в качестве вяжущего. Однако больший объем использования остается за минеральными вяжущими веществами. Воздушные вяжущие способны твердеть только на воздухе. Продукты твердения имеют малую водостойкость. Гидравлические вяжущие способны твердеть и длительное время сохранять прочность как в воде, так и на воздухе. Автоклавные вяжущие способны твердеть в условиях повышенной температуры и давления. Основными предста-

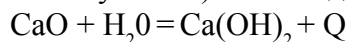
вителями являются гипсовые и известковые вяжущие. Их используют для изготовления растворов, бетонов, выпуска смешанных вяжущих и различных изделий. В гидротехническом строительстве используют ограниченно. На основе извести выпускают кладочный раствор для надводной части объектов, известь используется для стабилизации грунтов и снижения их водонепроницаемости.

3.2. Известь воздушная

Известь получают обжигом кальциевых или кальциево-магнелиевых пород до полного удаления углекислого газа. Все используемые породы в качестве основного вещества содержат карбонат кальция CaCO_3 присутствует небольшое количество MgCO_3 в качестве примесей присутствуют глины. Нагрев до температуры 1200°C приводит к декарбонизации карбонатов кальция и магния:



Обжиг происходит в шахтных, вращающихся печах, загружаемых дробленой исходной породой. Конечный продукт отправляется в виде кускового материала, порошка или теста. При содержании в сырьевом материале глинистых примесей не более чем 8 % получают воздушную известь, при большем содержании глинистых примесей образуется гидравлическая известь. В зависимости от содержания MgO , известь классифицируется на кальциевую ($\text{MgO} < 5\%$), магнезиальную ($\text{MgO} 5\text{--}20\%$), высокомагнезиальную, или доломитовую ($\text{MgO} 20\text{--}40\%$). Известь воздушная. Выпускается в негашеном виде (позвесть-кипелка) и виде теста (позвесть-пушонка). Взаимодействие с водой происходит по реакции:



Выделяемое при гидратации значительное количество тепла разогревает известковое тесто, испаряет часть воды, в результате чего гашеная известь разрыхляется. При увеличении количества воды получают известковое тесто. Негашеная известь может иметь различную дисперсность. Выпускается кусковая известь, после ее размолва получают порошкообразную известь. В процессе помола возможно введение различных минеральных добавок (шлак, вулканические породы, песок). Качество помола для воздушной извести оценивается по остатку на сите N02, который должен быть не более 1,5 %, а для сита N008 не более 15 %. Основные требования ГОСТ 9170–77 представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Технические требования, предъявляемые к воздушной извести.

Компонент	Негашеная, % по массе						Гашеная, % по массе сорта	
	кальциевая, сорта			магнезиальная (доломитовая), сорта			первого	второго
	1	2	3	1	2	3		
Активные $\text{CaO} + \text{MgO}$, на менее:								
без добавок	90	80	70	85	75	65	67	60
с добавкой	65	55	-	60	50	-	50	40
Активные MgO , не >	5	5	5	20(40)	20(40)	20(40)	-	-
CaO , не >	3	5	7	5	8	11	3	5
Без добавок	4	6	-	6	9	-	2	4
Непогасившиеся зёрна, не >	7	11	14	10	15	20	-	-

Примечание. В скобках указано содержание MgO в доломитовой извести. Известь в зависимости от времени гашения делится на быстрогасящуюся (до 8 мин), среднегасящуюся (до 25 мин) и медленногасящуюся (около 25 мин). Известь гидравлическая. Получают обжигом известняка, мергеля, мела при температуре до 1200°C . В этом диапазоне температур глинистые включения разлагаются с выделением оксидов SiO_2 , Al_2O_3 .

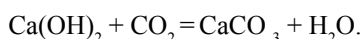
Fe_2O_3 (см рис.) вступающих во взаимодействие с CaO . Результаты химических реакций являются силикаты 2CaOSiO_2 , алюмосиликаты CaOAl_2O_3 и ферриты кальция CaOFe_2O_3 . Благодаря образованию этих соединений, известь обладает способностью твердеть и сохранять прочность растворов и бетонов на ее основе не только на воздухе, но и в воде.

Таблица 3.2

Технические требования к гидравлической извести

Компоненты, показатель	Слабогидравлическая	Сильногидравлическая
Активные $\text{CaO} + \text{MgO}$, %		
не более	65	40
не менее	40	5
Активные MgO , % не более	6	6
CO_2 , не более	6	6
Предел прочности образцов через 28 суток твердения, МПа, не менее при изгибе при сжатии	0,4 1,7	1 5

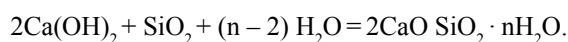
После обжига известь подвергается помолу. Дисперсность гидравлической извести контролируется прохождением через сита N02 и N008, остатки на которых составляют соответственно не более 1,5 и 15 % массы просеиваемой навески. На основе гидравлической извести производится гидравлическое вяжущее. Основным компонентом выступает известь, но на этапе помола вводятся активные минеральные добавки – доменный шлак, природные вулканические породы, а также гипсовый камень. Твердение составов на основе извести связаны с протеканием четырех параллельных процессов: – удаление из раствора свободной воды; – карбонатное твердение; – гидратное твердение; – гидросиликатное твердение. Гидратное твердение определяется кристаллизацией $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из пересыщенного водного раствора при взаимодействии извести с водой. Отдельные кристаллы агломерируют и формируют первичную структуру с начальной прочностью. Высыхание гидратированного известкового теста сближает кристаллы гидроокиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ возникают предпосылки их срастания в кристаллический каркас. Взаимодействие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с углекислым газом приводит к образованию кристаллов карбоната кальция, упрочняющих начальную структуру гидратов:



Гидравлическая известь проявляет свойства воздушного гидравлического вяжущего. Кристаллизация гидрата окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, и последующее частичное превращение ее в углекислый кальций характерны для воздушных вяжущих. Формирование на основе силикатов, алюминатов и ферритов соответствующих гидросиликатов, гидроалюминатов и гидроферритов определяют гидравлические возможности материала. Для гидравлической извести соотношение основных окислов характеризуется гидравлическим модулем:

$$m = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,7 \dots 1,9$$

Гидроокись кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, во взаимодействии с кварцем образует гидросиликаты кальция:



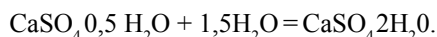
В обычных условиях скорость этого процесса невелика, но при взаимодействии водяного пара с давлением до 0,8 МПа и температурой до 175 °С скорость прохождения реакции гидратации резко повышается. На этом основано получение силикатных бетонов и силикатного кирпича. Известковые вяжущие применяются для приготовления растворов и бетонов, работающих в сухих условиях, а при использовании гидравлической извести – во влажных. Производятся плотные и ячеистые силикатные бетоны автоклавного твердения, защитные и декоративные известковые краски.

3.3. Гипс

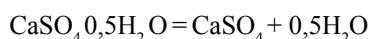
Сырьем для производства гипсовых вяжущих используется природный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Нагрев исходного сырья прошедшего измельчение и помол, при температуре 110–180 °С ведет к дегидратации двуводного гипса:



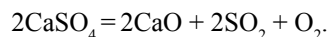
Обжиг осуществляется в шахтных вращающихся печах или гипсоварочных котлах. Окончательным этапом производства является помол продуктов обжига. При нагреве в открытых аппаратах, когда вода удаляется из сырья в виде пара, получают мелкие кристаллы. В модификации $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ образующие строительный гипс. При обработке высокосортного сырья в герметичных аппаратах под давлением в среде насыщенного водой пара или при кипячении в водных растворах образуются более плотные и крупные кристаллы α -модификации $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – основной компонент высокопрочного гипса. Различие α - и β -форм полуводного гипса заключается в протекании процесса гидратации, и соответственно и в различной пористости и прочности затвердевшего гипсового камня. Для гипса при меньшем водопотреблении характерна повышенная прочность. Твердение гипсовых вяжущих происходит в результате взаимодействия с водой и образования двуводного сульфата кальция



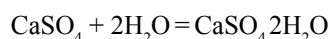
При температуре обжига 600–900 °С получают высокообжиговое вяжущее вещество – ангидритовый цемент:



Дальнейшее повышение температуры до 900–1000 °С позволяет получать вяжущее вещество эстрихгипс:



Высокообжиговый гипс твердеет более медленно, чем строительный, но продукты гидратации имеют более высокую прочность и водостойкость. Активизатором твердения выступает известь, шлак. Гидратация осуществляется по формуле:



Строительный гипс по прочности делится на 12 марок: от Г-2 до Г-25; показатель марки соответствует минимальной прочности на сжатие в МПа. По срокам схватывания выпускается быстротвердеющее вяжущее: начало схватывания – не ранее 2 мин, конец – не позднее 15, нормальнотвердеющее – начало не ранее 6, конец – не позднее 30 мин, медленнотвердеющее – начало не ранее 20, конец не нормируется. Вяжущие грубого, среднего и тонкого помолов имеют соответственно остатки на сите N02 в% по массе, 23, 14 и 2. Гипсовое вяжущее используется для изготовления панелей, плит, перегородок, гипсокартонных листов, стеновых камней, штукатурных смесей, архитектурных деталей и т.д. Ангидритовый цемент применяют для штукатурных и кладочных растворов, тяжелых и легких бетонов, устройства бесшовных полов. На основе эстрих гипса изготавливают растворы кладочные и штукатурные, выполняют подготовку под линолеум, применяют в производстве цементов. Полуводный гипс выступает одним из основных компонентов в гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ). Состав вяжущего в% по массе: гипс полуводный – 50–75; портландцемент 15–25; пуццолановая добавка (диатомит, трепел и т.д.). Такая добавка, состоящая в основном из SiO_2 , связывает свободную известь, выделяющуюся при гидратации цемента. Близкими к этой группе являются также гипсошлакоцементно-пуццолановые (ГШЦП) и гипсоизвестьково-шлаковые (ГИШВ) вяжущие. Комбинированные вяжущие используются в производстве панелей, санитарных кабин, устройстве оснований под полы и т.д.

3.4. Портландцемент

Портландцемент – наиболее широко применяемое в практике строительства вяжущее. Служит основой для получения большой группы специальных цементов: быстротвердеющих, пластифицированных, дорожных, гидрофобных, шлакопортландцемента и других. Этот вид вяжущего и его производные являются определяющими в гидротехническом строительстве. Портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, полученное тонким помолом клинкера, гипса и добавок. Клинкер – продукт обжига до спекания рационально подобранной сырьевой смеси, состоящей из известняка, глины и других материалов. В результате полного взаимодействия извести с гидравлическими компонентами образуются основные клинкерные составляющие, определяющие основные свойства портландцемента (табл. 3.3.).

Таблица 3.3

Содержание клинкерных минералов в портландцементе

Химическое название	Термин	Технический индекс	Химическая формула	Содержание в цементе, %
Трёхкальциевый силикат	алит	C_3S	$3CaO \cdot SiO_2$	45–65
Двухкальциевый силикат	белит	C_2S	$2CaO \cdot SiO_2$	15–35
Трёхкальциевый алюминат	целит	C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	4–14
Четырёхкальциевый алюмоферрит	алюминат	C_4AF	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	10–18

Из числа клинкерных минералов наиболее важным является трех кальциевый силикат C_3S , определяющий скорость твердения, прочность и другие важные свойства цемента (рис. 3.1). Двухкальциевый силикат C_2S твердеет медленно, но при длительном твердении достигает высокой прочности. Трехкальциевый алюминат обеспечивает быструю гидратацию и твердение, но достигаемая прочность незначительна. Является причиной протекания сульфатной коррозии бетонов, поэтому в сульфатостойком портландцементе содержание C_3A не превышает 5%. четырехкальциевый алюмоферрит

C_4AF оказывает значительного влияния на скорость твердения и тепловыделение при гидратации портландцемента (табл. 3.4.). Для получения цемента требуемого назначения, с выдерживанием необходимого соотношения между клинкерными минералами выполняется расчет сырьевой шихты. Сырьевым материалом служат карбонатные породы, содержащие $CaCO_3$ (известняк, мел) и глины. Соотношение компонентов Г : 3. Могут использоваться мергели (природная смесь известняка и глины), доменные шлаки, золы от сжигания энергетических углей.



Рис. 3.1. Скорость твердения клинкерных минералов в нормальных условиях: 1 – C_3S ; 2 – C_2S ; 3 – C_3A ; 4 – C_4AF

Таблица 3.4

Скорость тепловыделения (Дж г) клинкерных минералов цемента во времени

Клинкерный минерал	Тепловыделение на период в сутках		
	7	28	180
C_3S	461	486	566
C_2S	105	168	230
C_3A	662	687	1026
C_4AF	262	377	416

Химический состав портландцементного клинкера находится в пределах, % по массе: $\text{CaO} - 63...66$; $\text{SiO}_2 - 21...24$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 4...8$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2...4$; $\text{MgO} - 0,5...5$. $\text{SO}_3 - 0,3...1$; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - 0,4...1$; $\text{TiO}_2 + \text{Cr}_2\text{O}_3 - 0,2...5$.

Необходимое соотношение между окислами достигается введением корректирующих добавок – колчеданные огарки, трепел, опока, шлаки. Технологическая схема производства цемента включает два этапа: получение клинкера и измельчение клинкера с добавками до необходимой тонкости помола конечного продукта – цемента.

Температура

→ 300 → 400 → 600 → 800 → 1000 → 1200 → 1400

Таблица 3.5

Спекание портландцемента

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ Дегидротация каолина	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{C}_2\text{O}_2$ $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CA}$ $\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CF}_1\text{CF}_2$ декарбонизация известняка $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O} + 2\text{SiO}_2$	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{S}_3\text{CA} + 2\text{CaO}$ $\rightarrow \text{C}_5\text{A}_3$ $(\text{CF}_1\text{C}_2\text{F}) + (\text{CA} - \text{C}_3\text{A}_3) \rightarrow \text{C}_4\text{AF}$	$\text{C}_2\text{S} + \text{CaO} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$ $\text{C}_3\text{A}_3 + 4\text{CaO} \rightarrow 3\text{C}_3\text{A}$
---	--	--	--

Производство клинкера включает разработку и доставку на завод сырьевых материалов, измельчение и перемешивание компонентов, обжиг сырьевой смеси до спекания, получение клинкера и охлаждение полученного продукта.

Второй этап обеспечивает получение цемента с комплексом необходимых добавок и хранение материала до момента отправки. Возможны три способа получения клинкера – мокрый, сухой и комбинированный. По мокрой схеме подготовки сырьевых материалов и их обжиг происходит в виде жидкотекучей массы шлама с влажностью 35–45 %.

Сухой способ предполагает перемешивание и измельчение материалов в сухом состоянии, после чего сырьевая смесь в виде порошка «муки» поступает в печь обжига. Возможен комбинированный способ, при котором сырьевая смесь подготавливается в состоянии шлама, но перед обжигом выполняется обезвоживание. Сухой способ является наиболее экономичным, так как расход энергии в этом случае снижается в 1,5–2 раза при сравнении с традиционным мокрым способом. В связи с этим строительство новых и реконструкция старых цементных заводов происходит с созданием сухого способа производства. Обжиг сырьевых материалов выполняется во вращающихся печах длиной 95–230 м и диаметром 5–7 м. Производительность печи с размерами 5 x 185 м составляет 1800 т/сутки. Печь работает по принципу противотока, при котором сырье в виде шлама или порошка загружается со стороны верхнего (холодного) конца, а со стороны нижнего (горячего) вдувается топливо. Топливом служит природный газ, мазут, воздушноугольная смесь. При вращении печи со скоростью 1–2 об/мин происходит медленное перемещение материала по длине печи через все температурные зоны, обеспечивающие протекание всех физикохимических процессов получения клинкера (рис. 3.2).

Зона испарения (зона I) с температурой 70–200 °С обеспечивает сушку смеси поступающего материала. Зона подогрева (зона II) имеет температуру от 200 до 700 °С. В сырье

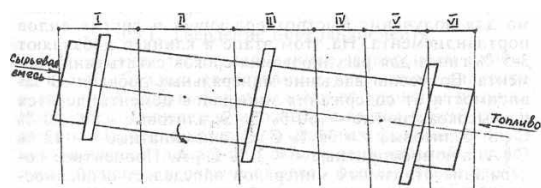


Рис. 3.2. Зонирование вращающейся цементной печи

происходит выгорание органических примесей, удаление связанной воды из глинистых материалов. При мокром способе зона II занимает 50–60 % длины печи, при сухом способе ее длина значительно меньше. Зона декарбонизации (зона III) с температурой 700–1100 °С предназначена для декарбонизации известняка. При этих температурах происходит

разложение дегидратированной глины, образуются минералы $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$; $\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ и частично 2CaO SiO_2 .

Зона экзотермических реакций (зона IV) имеет температуру $1100\text{--}1250^\circ\text{C}$, достаточная для осуществления твердофазовых реакций образования $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$; $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ и 2CaO SiO_2 .

Зона спекания (зона V) с максимальной температурой 1450°C позволяет получать $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$. Расплавляемый материал при вращении печи формируется в гранулы с размером $5\text{--}20$ мм. называемые клинкером.

Зона охлаждения (зона VI) с понижением температуры с 1300 до 1000°C предназначена для завершения формирования состава и структуры клинкера. После выхода из печи гранулы охлаждаются с 1000°C до $100\text{--}200^\circ\text{C}$. после чего хранятся на складе одну-две недели.

Помол клинкера происходит в мельницах, работающих в открытом или закрытом цикле. Последнее позволяет тонко измельчать клинкер до удельной поверхности $1900\text{--}5000$ см²/г и регулировать в цементе содержание частиц отдельных размеров. Это необходимо для получения быстротвердеющих и других видов портландцемента. На этом этапе в клинкер добавляют $3\text{--}5\%$ гипса для регулирования сроков схватывания цемента. Возможно введение минеральных добавок. В зависимости от содержания минералов цементы делятся на высокоактивные $\rightarrow 60\%$ C_3S , алитовые $\rightarrow 50\text{--}60\%$ C_3S , белитовые $\rightarrow 35\%$ C_2S , алюминатные $\rightarrow 12\%$ C_3A , алюмоферритные $\rightarrow 2\%$ C_3A . Процентное содержание отдельных минералов определяет особенности твердения и основные свойства цемента.

Прочность и скорость твердения C_3S . Увеличение C_2S снижает скорость твердения. Самую высокую начальную скорость гидратации имеет C_3A . Этот минерал определяет солейстойкость цементов. Для сульфатостойких цементов его $\%$ ограничен до 5. Важнейшие свойства цемента определены совместным содержанием C_3S и C_2S , которое составляет 75% . Для придания специальных свойств изменяют традиционное содержание отдельных минералов (табл. 3.6). Так, для быстро- твердеющего цемента увеличивается содержание C_3S и C_3A . Для цементов с пониженным тепловыделением, что важно в массивных бетонных гидротехнических конструкциях, ограничивается содержание C_3S и C_3A . Для получения белого цвета выводятся окрашивающие соединения железа (C_4AF должен быть менее 3).

Таблица 3.6

Минералогический состав цементного клинкера

Тип цемента	Минералогический состав, %
Портландцемент	$\text{C}_3\text{S} = 45\text{--}65$; $\text{C}_2\text{S} = 15\text{--}35$; $\text{C}_3\text{A} = 4\text{--}14$; $\text{C}_4\text{AF} = 10\text{--}18$.
Быстротвердеющий портландцемент	$\text{C}_3\text{S} + \text{C}_3\text{A} \geq 65$
Сульфатостойкий цемент	$\text{C}_3\text{S} < 50$; $\text{C}_3\text{A} < 5$; $\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF} < 22$.
Белый цемент	$\text{C}_3\text{S} = 42\text{--}44$; $\text{C}_2\text{S} = 35\text{--}37$; $\text{C}_3\text{A} = 14\text{--}15$; $\text{C}_4\text{AF} < 3$

3.5. Свойства портландцемента и его применение

3.5.1. Твердение портландцемента

Цементное тесто, полученное затворением цемента водой, обладает свойствами текуче-вязкой жидкости и заполняет любую форму, однако со временем подвижность теста снижается, оно превращается в цементный камень. Изучение комплекса сложных физико-химических процессов, лежащих в основе этих явлений, позволяет управлять и организовывать формирование структуры цементных материалов с заданными свойствами. Взаимодействие цемента с водой называется гидратацией. В силу многокомпонентности цемента необходимо рассматривать комплекс процессов, происходящих с отдельными клинкерными минералами.

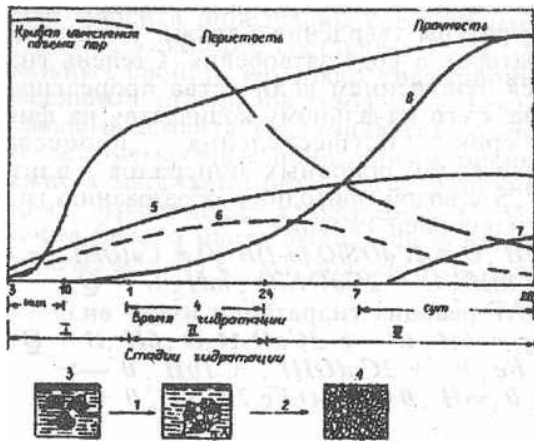


Рис. 3.3. Схема процесса гидратации цемента и развития

1 – формирование основной структуры; 2 – конденсация структуры цементного камня; 3 – неустойчивая структура; 4 – стабильная структура; 5 – длинные волокна; 6 – эттрингит; 7 – моносульфат; 8 – короткие волокна

продуктами гидратации. На момент начала гидратации зерна цемента окружены водой. В результате химических реакций на поверхности зерен и в объеме жидкости формируются иглообразные кристаллы. При совместном срастании они образуют пространственный каркас. Это соответствует «схватыванию» цемента. В интервале 8–10 часов пространство между гидратируемыми зернами вяжущего заполняется иглами кристаллов «алюминатной структуры».



Рис. 3.4. Формирование структуры цементного камня 1 – капиллярное пространство; 2 – исходное зерно портландцемента; 3 – зона перехода

Масса вяжущего быстро теряет подвижность, начинается набор механической прочности твердеющего цементного камня. Затем последовательно образуются мелкокристаллические продукты гидратации C_2S и C_3S . Формируется основная силикатная структура, являющаяся носителем основных свойств. Через 28 суток структура в основном представлена силикатными кристаллическими образованиями. Проникновение воды в зерно цемента происходит очень медленно. Для обычного цемента с удельной поверхностью 2000–3000 см²/г характерно содержание 30...40% зерен размером 30 мк и более, которые гидратируются только поверхностно и тем самым не участвуют в формировании прочности. На глубину 3 мк зерно гидратируется 7 дней, а на глубину 10 мк – 6 месяцев (рис. 3.3.).

3.5.2. Строительно-технические свойства портландцемента

Абсолютная плотность портландцемента = 3,25 г/см³, плотность в насыпном состоянии 1,22 г/см³. Тонкость помола цемента характеризуется массой цемента, прошедшего через сито N008 (размер ячейки сита 0,08 мм), и должна быть не менее 85%.

Таблица 3.7

Портландцемент и его разновидности

Расход цемента, кг/м ³	В/Ц				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,30	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,40	1,46	-	-	-

Дисперсность цемента может характеризоваться удельной поверхностью, равной суммарной поверхности зерен к массе навески, $\text{см}^2/\text{г}$. У рядовых цементов эта величина составляет 2000–3000 $\text{см}^2/\text{г}$. Быстротвердеющих и высокопрочных – 3500–5000 $\text{см}^2/\text{г}$.

Водопотребность и схватывание

Определение сроков схватывания и равномерности изменения объема проводят на цементном тесте нормальной густоты, стандартной консистенции. Нормальная густота выражается количеством воды в% от массы использованного цемента. Определение проводят на приборе Вика (рис. 3.5). Масса подвижной части прибора составляет 200 г. В нижней части подвижного стержня установлен измерительный пестик. Цементное тесто помещается в коническую форму, устанавливаемую подвижную часть прибора. Измерительный пестик приводится в соприкосновение с поверхностью цементного теста, после чего замеряется высота свободного погружения пестика в тесто. За нормальную густоту принимается такая консистенция, когда пестик не доходит до дна 5–7 мм (ГОСТ 10178–86). Нормальная густота находится в пределах 24–28%. Сроки схватывания устанавливаются с помощью того же прибора, но в нижнюю часть вместо пестика устанавливается измерительная игла. Началом схватывания является промежуток времени от момента затворения цементного теста до начала загустевания, зафиксированный иглой прибора Вика. Конец схватывания – время до момента, когда тесто полностью теряет свою пластичность. Показатели являются нормируемыми для цемента. Начало должно наступать не ранее 45 мин, а конец – не позднее 10 час. Для выдерживания этих показателей в состав цемента вводят добавку гипса – замедлителя схватывания в размере до 3,5%.

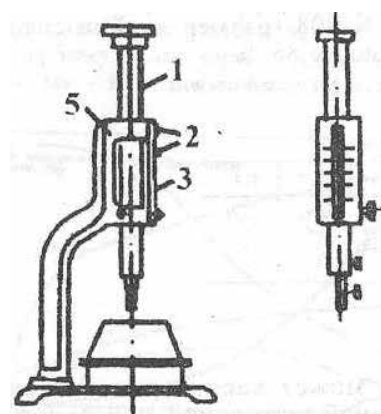


Рис. 3.5. Прибор Вика: 1 – цилиндрический стержень; 2 – указатель перемещения стержня; 3 – шкала; 4 – зажимный винт; 5 – обойма станины; 6 – пестик (измеритель густоты); 7 – коническая форма

Равномерность изменения объема при твердении. Процесс твердения является массообменным процессом. В результате чего происходят объемные изменения цементного камня и бетона на его основе. При твердении на воздухе объем уменьшается – происходит усадка цементного камня. Если выдерживание осуществляется в водной среде – наблюдается набухание. Цемент должен обеспечивать протекание этих противоположных процессов без появления следов разрушения. Для этого цемент проходит испытание кипячением образцов-лепешек в течение 4 ч в воде. Эксперимент считается успешным, если после этого отсутствуют трещины и искривления у образцов, в противном случае цемент не допускается к применению в строительстве. Одной из причин появления неравномерного деформирования является содержание в клинкере свободных окислов MgO и CaO . поздняя гидратация которых в среде схватившегося цемента вызывает появление напряжений, приводящих к зарождению трещин. При использовании в строительстве цемента, имеющего в своем составе в качестве добавок эти окислы, проверка его пригодности осуществляется запариванием образцов в автоклаве при давлении $2 \pm 0,05$ МПа. Деформации образцов контролируются при полном связывании трудногидратирующих окислов. Данная методика применяется при использовании в цементах минеральных тонкодисперсных добавок тепловых электростанций, шлаков и т.д. Прочность цемента определяется его сопротивлением при разрушении в процессе деформирования установленных образцов и характеризуется пределом прочности, измеряемым в МПа. В соответствии с ГОСТ 10478–85 установлены марки для портландцемента и портландцемента с минеральными добавками.

Таблица 3.8

Марки портландцемента и портландцемента с минеральными добавками

Марка цемента	Предел прочности, Мпа			
	При изгибе в возрасте		При сжатии в возрасте	
400	-	5,5	-	40
500	-	6,0	-	50
550	-	6,2	-	55
600	-	6,5	-	60

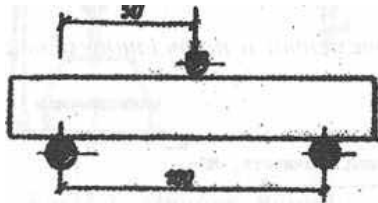


Рис. 3.6. Схема расположения цементного образца при испытании на изгиб

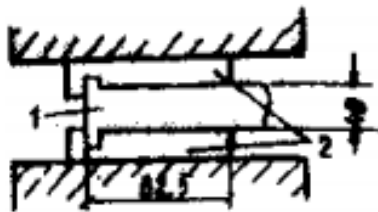


Рис. 3.7. Испытание образца (1) на сжатие с помощью пластин (2)

Прочность для такого материала, как твердый цемент зависит от прохождения реакции гидратации основных его компонентов, формирующих объем твердой фазы на определенный период времени (U_t). и от прочности цементного камня (V_n). что в совокупности определяет структуру цементного камня: $U_t + U_p = 1$. Твердая фаза U_t является неоднородной и включает несколько характерных составляющих: негидратированные клинкерные минералы, кристаллогидраты, гель. Соотношение между этими группами характеризуется степенью гидратации L , определяемой массой прореагировавших минералов к общей массе цемента. Пространственное распределение компонентов твердой фазы в объеме, объем и заполнение пространства жидкостью или газом определяют прочность цементного камня. Влияющими факторами для достижения необходимой величины и соответствующей прочности являются минералогический состав цемента и его тонкость помола, применяемое значение B/C для цементного камня, температура проведения

реакций гидратации и наличие добавок. Управление данными параметрами позволяет достичь необходимой прочности цементного камня. Активность и марка портландцемента устанавливаются по испытанию образцов балочек $4 \times 4 \times 16$ см. изготовленных из цементно-песчаной смеси соотношением $1 : 3$ при отношении $B/C = 0,4$. Испытание проводится в возрасте 28 суток после хранения образцов в воде с температурой $(20 \pm 2^\circ\text{C})$. Используется кварцевый песок с постоянной гранулометрией зерен, добываемый в г. Вольск на Волге.

Образцы испытываются на изгиб (рис 3.6.). после чего половинки балочек – на сжатие (рис. 3.7). Предел прочности на осевое сжатие, определенный на образцах – полемках в возрасте 28 суток, называется активностью цемента. В зависимости от активности устанавливается марка цемента.

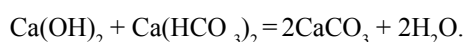
3.5.3. Коррозия цементного камня

Стойкость цементного камня по отношению к меняющимся факторам внешнего воздействия обеспечивает стойкость бетона конструкций на его основе. При сравнении основных компонентов бетона именно цементный камень с развитой системой пор активно взаимодействует с внешней эксплуатационной средой, сопровождаемый снижением плотности и прочности. Факторами, вызывающими разрушение цементного камня являются: циклическое морозное воздействие внешней среды, периодическое увлажнение и высушивание, циклическое воздействие высоких температур и др. Все они принадлежат к факторам физической коррозии, на основании чего бетон должен удовлетворять требуемой морозостойкости, атмосферостойкости, жаростойкости и иным критериям эксплуатации.

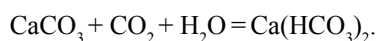
В случае воздействия газов, воды, растворов солей, кислот, щелочей и органических веществ происходит химическая коррозия цементного камня. Структура становится более

проницаемой для агрессивных агентов, возможно, корродирование находящейся в железобетонной конструкции стальной арматуры. Деструктивные процессы могут быть вызваны взаимодействием минералов цементного камня и заполнителей бетона с внешней средой, а также химическими взаимодействиями между самими компонентами бетона.

Химическая коррозия I вида вызвана маломинерализованными мягкими водами с жесткостью воды менее 4 мг.экв/л. в результате чего происходит вымывание (выщелачивание) наиболее растворимых продуктов гидратации. Таковым является гидрит окиси кальция, получаемый гидролизом C_3S . Количество $Ca(OH)_2$ достигает 15 % (по CaO) от массы цемента. Удаление $Ca(OH)_2$ приводит к ступенчатому гидролизу силикатов, алюминатов, алюмоферритов. Постепенно структура цементного камня разрыхляется и разрушается. Вымывание 15–30 % общего содержания $Ca(OH)_2$ в цементном камне приводит к снижению 40 % прочности цементного камня. Повышение гидрокарбонатной жесткости мягкой воды снижает растворимость $Ca(OH)_2$ так как в порах и капиллярах цементного камня образуется карбонат кальция $CaCO_3$ снижающей проницаемость цементного камня:

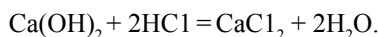


При содержании в воде агрессивной углекислоты происходит растворение карбоната кальция, а в последствии и образовавшегося бикарбоната кальция:

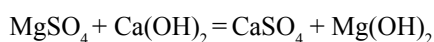


Химическая коррозия II вида определяется обменными реакциями кислот, солей, щелочей с гидратными соединениями цементного камня. Новообразования этих реакций являются легкорастворимыми или вымываемыми соединениями, эвакуация которых снижает плотность и пористость бетона.

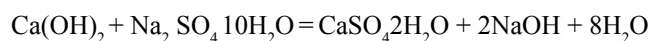
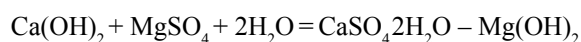
При наличии в воде свободных кислот ($pH < 7$) повышается растворимость $Ca(OH)_2$ по формуле:



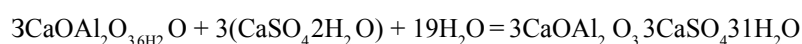
Магнезиальная коррозия приводит к образованию растворимых в воде солей магния: $MgCl_2 + Ca(OH)_2 = CaCl_2 + Mg(OH)_2$. Соль кальция $CaCl_2$ легкорастворима в воде, тогда как гидроксид магния $Mg(OH)_2$ малорастворим и выделяется в виде рыхлого, проницаемого водой осадка. При действии сульфата магния происходит образование $CaSO_4$:



Химическая коррозия III вида происходит под действием растворенных в водной среде реагентов, взаимодействующих с минералами цементного камня. Продукты реакций являются кристаллическими соединениями и малорастворимы в воде. Кристаллизация таких продуктов с увеличением объема в порах цементного камня вызывает кристаллизационное давление, которое может вызвать деформации и последующие разрушения первичной структуры цементного камня. Инициаторами коррозии выступают сульфаты кальция, магния и натрия. Гидрат окиси кальция $Ca(OH)_2$ вступает в обменную реакцию с сульфатами:



Гипс, вступая в реакцию с гидроалюминатом кальция, образует гидросульфалюминат кальция, при этом его объем увеличивается в 2,86 раза от объема гидроалюмината:



Протекание приведенных реакций связано с содержанием ионов SO при дополнительном влиянии на эти реакции ионов Cl^- . В случае присутствия ионов Cl^- – сульфатная коррозия снижается, так как повышается растворимость сульфатоалюмината и гипса в присутствии хлоридов. Деструктивные процессы могут вызываться процессами жизнедеятельности микроорганизмов, водорослей. Биологический фактор воздействия вызывает химические процессы. Этот вид воздействия характерен для гидротехнических бетонных сооружений. Щелочи цемента обуславливают внутреннюю коррозию при взаимодействии с активным кремнеземом плотных заполнителей бетона. Причины процессов определяются не особенностями внешних факторов воздействия, а качеством материалов, используемых для изготовления бетонов. Проявление данной коррозии заключается в образовании щелочных силикатов в порах и на поверхности заполнителей в стесненных условиях, что связано с возникновением внутренних напряжений. В предельном состоянии возможно появление внутренних микродефектов и микротрещин. Для этих целей при наличии в плотном заполнителе аморфного кремнезема (вулканические стекла, опаловидные включения, сланцы слюдистые и т. д.) в цементе ограничивается содержание щелочных окислов (не более 0,6%). В цементном камне возможно проявление электрохимической коррозии арматуры, что нарушает ее сцепление с бетоном, происходит уменьшение сечения арматуры. Механизм электрохимической коррозии является действием блуждающих токов, изменением под их действием состояний внутренней жидкой среды цементного камня, а именно снижение pH. Все это интенсифицирует процесс растворения железа в жидкой фазе цементного камня. Продукты коррозии экранируют поверхность арматурных стержней. При их накоплении в ограниченных объемах появляются избыточные напряжения, приводящие к разрушению защитного слоя арматуры, металл становится открытым для агрессивных агентов внешней среды. Сохранение бетона в данных условиях агрессивного воздействия определяется наличием и величиной блуждающих токов в арматуре, видом используемого вяжущего, наличием добавок электролитов и степенью дефектности структуры цементного камня и бетона.

3.6. Специальные портландцементы

Многообразие эксплуатационных условий бетонов и растворов на основе цемента предопределяет постоянное развитие и интенсификация технологии производства строительных работ, необходимость выпуска широкой номенклатуры специальных видов портландцемента. К числу этих видов относятся: быстротвердеющий, пластифицированный, гидрофобный, сульфатостойкий, дорожный, тампонажный. Быстротвердеющий цемент (БТЦ) характеризуется интенсивным нарастанием прочности на ранних этапах твердения. Это достигается более тонким помолом цемента и регулированием его химического и минералогического сырья. Количество активных минералов ($C_3S + C_3A$) составляет 60–65%. Тонкость помола должна быть не менее 3500 см/г и может достигать 5000 см²/г. Допускается введение активных минеральных добавок и гранулированного шлака не более 10%. Темпы увеличения прочности показателей даны в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Прочность быстротвердеющего цемента

Марка	Предел прочности МПа, не менее			
	При изгибе		При сжатии	
	3 сут.	28 сут.	3 сут.	28 сут.
400	4	5,5	25	40
500	4,5	6,0	28	50

Применение быстротвердеющего цемента в гидротехническом строительстве позволяет увеличить скорость выполнения монолитных бетонных работ, а также сократить продолжи-

тельность тепловой обработки при заводском изготовлении железобетонных конструкций. кроме того снижается расход цемента на один метр кубический бетона. Разработан сверхбыстротвердеющий цемент (СБТЦ), который позволяет обеспечить еще более высокие темпы набора прочности бетона. Особенностью его минералогического состава является повышенное содержание C_3A совместно с введением добавок-ускорителей (хлорид или фторид кальция). Такой цемент имеет короткие сроки схватывания. Прочность соответственно составляет на 1, 3, 8 сутки твердения 30, 40, 60 МПа. Бетоны на основе СБТЦ через 1–4 часа имеют распалубочную прочность, что позволяет отказаться в заводской технологии тепловой обработки изделий.

Таблица 3.10

Минеральное вяжущее, изготовление, процесс твердения и свойства

	Гипс	Известь	Гидр. известь	Цемент
				C_3A, C_4AF
Подготовка П	Мелкий помол	Гашение $CaO + H_2O - Ca(OH)_2$		Тонкий помол с добавкой 3 % гипса
Форма поставки	порошок	Порошок или тесто	Порошок	Порошок
Обжиг Температура Химические процессы	В шахтной, вращающейся печи или в гипсоварочном котле 180°C, для специальных гипсов 1000°C $CaSO_4 \cdot 2H_2O - CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O + 1,5H_2O$	1200°C Декарбонизация $CaCO_3 - CaO + CO_2$	1200°C Декарбонизация обезвоживание глины и частичное взаимодействие Минерал C_2S	1450°C Декарбонизация. Спекание $CaSO_4 + 2C \rightarrow CaS + 2CO_2$ Полное взаимодействие извести с гидравлическими составляющими с образованием клинкерных минералов C_2S, C_3S
Переработка (использование)	Гипс (+ песок) + вода	С водой – штукатурка. С песком и водой раствор	С песком и водой – раствор	С песком и водой – раствор. С заполнителями и водой – бетон.
Процесс твердения	$CaSO_4 \cdot 0,5 H_2O + 1,5H_2O - CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (рекристаллизация)	$Ca(OH)_2 + CO_2 - CaCO_3 + H_2O$	Карбонизация и гидратация (твердеет медленнее, чем цемент)	Гидратация
Свойства	Неводостоек, твердеет в результате взаимодействия с водой	Относительно водостоек	Водостоек, твердеет за счет реакции с водой и воздухом	Водостоек. Твердеет благодаря реакции с водой
Прочность при сжатии	Прочность при сжатии 25 МПа	Требований нет	2–5 МПа	40–60 МПа
Нормативный документ	ГОСТ 125–79	ГОСТ9179–77	ТУ 21–31–34–80	ГОСТ 10178–85

Пластифицированный цемент содержит в своем составе пластифицированную добавку – сульфитно-спиртовую бражку С ДБ (ОСТ 81–79–74). Количество вводимой при помоле портландцементного клинкера добавки составляет 0,15...0,25 % от массы цемента. Введение поверхностно-активной добавки обеспечивает ее закрепление тонким слоем к поверхности зерен цемента. При взаимодействии обычных цементных зерен с водой некоторая их часть слипается, образуя отдельные агрегаты. Часть зерен не успевает реагировать с водой. Необходимо увеличить ее количество от теоретической потребности, чтобы поднять подвижность смеси, состоящей в том числе из отдельных комочков, внутри которых частички непрореагировавшего цемента. Введение добавки позволяет избежать это явление и поднять тем самым эффективность использования вяжущего. При введении

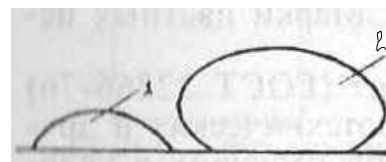


Рис. 3.8. Положение капли воды на гидрофобизированном цементном порошке; 1 – порошок слабогидрофобизован; 2 – порошок хорошо гидрофобизован

добавки СДБ возможно уменьшить водоцементное отношение в бетонах в среднем на 10 %, а в растворах на 12...14 %. При получении заданной прочности дозировка цемента снижается на 8...10 %. Добавка повышает подвижность, удобоукладываемость, морозостойкость, водонепроницаемость бетонов и растворов. При выполнении монолитных бетонных работ в гидротехническом строительстве вводятся ограничения по экзотермии бетона во избежание возникновения градиента температур в массивной конструкции. При охлаждении наружных слоев водой или воздухом центральная часть бетонируемого элемента может нагреться от тепловыделения цемента, что может приводить к образованию трещин. Снижение расхода цемента за счет эффективного действия пластифицирующей добавки уменьшает экзотермию бетона. Пластифицированный цемент имеет те же марки по прочности, что и обычный портландцемент, и может применяться во всех тех случаях, что и портландцемент. Гидрофобный портландцемент является разновидностью портландцемента. Дополнительно при помоле обычного портландцементного клинкера вводятся гидрофобные добавки: асидол – мылонафт в размере 0,1...0,12 % массы цемента, мылонафт (0,1...0,25 %), олеиновая кислота (0,06...0,1 %), окисленный петролатум (0,15...0,3 %). Введение компонентов создает вокруг цементных зерен гидрофобную оболочку из молекул гидрофобных ПАВ, сохраняя активность цемента при длительном хранении во влажных условиях. Гидрофобные цементы рекомендуются для употребления в районах с высокой влажностью. Оболочка, полученная вокруг зерен цемента, при приготовлении бетонов в смесителях, удаляется и не изменяет основных свойств вяжущего. Бетоны и растворы на основе гидрофобного цемента характеризуются повышенной пластичностью, удобоукладываемостью в процессе бетонирования. В период эксплуатации бетоны имеют повышенную водонепроницаемость, морозостойкость за счет способности гидрофобизирующих добавок вовлекать в бетонную смесь воздух и создавать тем самым резервные поры в структуре бетона. Эти показатели наиболее важны для бетонов гидротехнического строительства.

Белые и цветные портландцементы используются для отделочных строительных работ. Основой этой группы вяжущих является белый цемент (ГОСТ 965–78), получаемый совместным тонким измельчением маложелезистого клинкера, минеральных добавок (до 20 %) и природного гипса. Количество окрашивающих окислов (Fe_2O_3 , MnO , Cr_2O_3 и др) в клинкере должно быть минимальным. Однако если сырьевая смесь имеет трое количество окислов железа (не более 0,35...0,45 %), то на выходе из печи обжига такой клинкер отбеливается в восстановительной среде и быстро охлаждается, что позволяет перевести окись железа в закисную форму. В клинкере цветных портландцементов (ГОСТ 15825–86) допускается повышенное содержание окрашивающих окислов в зависимости от цвета самого декоративного цемента. Минералогический состав клинкера белого цемента, %:

$$\text{C}_3\text{S} = 42 - 44; \text{C}_2\text{S} = 35 - 40; \text{C}_3\text{A} = 14 - 15; \text{C}_4\text{AF} = 0,9 - 1,4.$$

Основным показателем для белого цемента является степень белизны, определяемая по коэффициенту отражения в % по отношению к эталону – молочному матовому стеклу МС-14. Степень белизны для белого цемента должна быть не менее: для первого сорта – 80 %; второго – 75 %; третьего – 68 %. Выпускаются марки цемента 400 и 500. Цементы красного, желтого, коричневого цвета получают совместным помолом белого клинкера и оксидов железа (охра, железный сурик, гематит). Цветной цемент должен содержать не менее 80 % клинкера белизной не менее 68 %, не более 6 % активной минеральной добавки, не более 15 % минерального пигмента или не более 0,5 % органического пигмента от массы цемента. Черный цемент получают использованием углеродистых пигментов диоксида марганца, зеленый – оксида хрома, голубой – кобальта. Пигменты должны быть свето- и щелочестойкими, не снижать прочность и морозостойкость цементного камня. Марки цветных цемента 300, 400, 500.

Сульфатостойкий портландцемент (ГОСТ 22266–76) применяется для наружных зон гидротехнических и других железобетонных конструкций, работающих в условиях переменного увлажнения и высушивания, замораживания и оттаивания, подверженных действию сульфатной агрессии. Стойкость цемента обеспечивается нормированием химико-минералогического состава клинкера. Выпускаются следующие виды: сульфатостойкий портландцемент марки 400; сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками марок 400 и 500; сульфатостойкий шлакопортландцемент марок 300 и 4000. В соответствии с ГОСТ 10178–76 оговаривается процентное содержание отдельных компонентов минералогического состава клинкера (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Минералогический состав клинкера сульфатостойкого цемента

Состав минералов, %	Содержание клинкера, %			
	сульфато– стонкого портландцемента	сульфато-стойкого портландцемента с минеральными добавками	сульфато-стонкого лакопортландцемент-та	пуццоланового портландцемента
C_3S , не более	50	не нормируется		
C_3A не более	5	5	8	8
$C_3A + C_4AF$	22	22	не нормируется	
MgO , не более	5	5	5	5

В качестве добавок выступает гранулированный доменный шлак, активные минеральные добавки. Содержание добавок в сульфатостойких цементах различного вида представлены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Содержание активных добавок %, по массе цемента

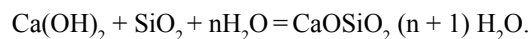
Портландцемент	Гранулированный доменный шлак	Активные минеральные добавки	
		осадочного происхождения, кроме глиежей	прочие (включая глиежи)
Сульфатостойкий	Не допускаются		
То же, с минеральной добавкой	Не менее 10 и не более 20	Не менее 5 и не более 10	Не допускаются
Сульфатостойкий шлакопортландцемент	Не менее 21 и не более 60	-	-
Пуццолановый	-	Не менее 20 и не более 30	Не менее 25 и не более 40

Нормирование содержания C_3A и C_3S обеспечивает плавный набор прочности при умеренном тепловыделении гидратации цементов. Содержание активных добавок обеспечивает более плотную структуру продуктов гидратации смешанных цементов. Происходит почти полное связывание извести этими добавками, что определяет повышенную стойкость по отношению к воде и сульфатной агрессии. Твердение может осуществляться во влажных условиях и воде, что позволяет применять такие цементы в подвижных и подземных конструкциях. Дорожные цементы применяются в покрытиях автомобильных дорог и аэродромов. Исходя из специфики эксплуатации, от бетонов требуется высокая морозостойкость, сопротивление истиранию и удару, высокая прочность на изгиб. Минералогический состав клинкера отличается ограничением содержания C_3A (не более 10%) и высоким присутствием C_3S и C_4AF . В целях повышения эксплуатационных свойств – вводятся поверхностно-активные добавки. Тампонажные портландцементы (ГОСТ 1581–85) используются при цементировании нефтяных и газовых скважин с целью их защиты от действия грунтовых вод. Выпу-

скаются следующие виды цементов: тампонажный, утяжеленный с повышенной плотностью цементного камня, песчанистый с повышенной термо- и коррозиестойкостью, солестойкий для эксплуатации в среде высокоминерализованных пластовых вод, низкогигроскопичный с повышенным сроком хранения. В зависимости от назначения тампонажные цементы делятся на цементы для холодных (до $22 \pm 2^\circ\text{C}$) и горячих скважин (до $75 \pm 3^\circ\text{C}$). Особенности применения тампонажных цементов нормируют сроки схватывания, начало – не ранее 2 ч для холодных и 1 ч 45 мин для горячих скважин, конец – не позднее 5 ч для горячих и 10 ч для холодных скважин. Цементы должны обладать высокой подвижностью для закачивания в скважину, для чего вводятся ПАВ в размерах не более 2%. Нормируется прочность на изгиб в зависимости от температуры эксплуатации скважины.

3.6.1. Пуццолановые цементы

Пуццолановые вяжущие – композиционные гидравлические вяжущие вещества, совместного помола портландцементного клинкера и активных минеральных добавок, вводимых в количествах более чем 20%. Они также могут быть получены на основе бесклинкерных вяжущих (известково-пуццолановые, известково-шлаковые и т.д.). Активные минеральные добавки могут быть природными или искусственными. При смешивании в тонкодисперсном состоянии с известковым тестом обладает свойством твердеть в воздушных и водных условиях хранения. Происходит взаимодействие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с активным кремнеземом добавки с образованием малорастворимых гидросиликатов кальция:



Гидравлическая активность добавок оценивается количеством CaO , поглощаемой из насыщенного известкового раствора за период 30 суток. Природными являются добавки осадочного и вулканического происхождения. Осадочными являются диатомиты, трепел, опока, глии. К вулканическим минеральным добавкам относятся туф, трасс, пемза, трепел. К минеральным добавкам вулканического происхождения относятся пепел, туф, трасс, пемза. После измельчения все названные компоненты можно добавлять при производстве шлакопортландцементов в размере не более 10% от массы цемента. Искусственные добавки включают: шлаки доменные, шлаки электротермофосфатного гранулирования, золы и шлаки тепловых электростанций, нефелиновые шламы. Шлаки металлургические являются наиболее характерными представителями этой группы. Их основные свойства, в том числе – активность, определяются способом получения (охлаждения). В зависимости от скорости охлаждения в шлаках изменяется соотношение между кристаллической и стекловидной фазами. Так как гидравлическая активность определяется присутствием аморфной стеклофазы, охлаждение расплава шлака производят быстро. В этом случае образуется до 95% стекловидной фазы от общей массы материала. Химический состав шлаков определяется видом и свойствами железных руд, качеством кокса и видом выплавляемого чугуна. В зависимости от процентного содержания главных окислов шлаки делятся на основные и кислые. Для этой классификации используется модуль основности:

$$K_0 = \text{MgO} + \text{CaO}/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$$

для основных шлаков $K_0 > 1$, для кислых он является меньше, чем единица (табл. 3.13.).

Таблица 3.13

Химический состав доменных шлаков

Наименование показателей	Группа шлаков		
	сверхкислые	кислые	основные
Содержание окислов, %			
SiO ₂	47.4–60.4	33.3–45.8	25.1–37.3
Al ₂ O ₃	21.9–23.9	8.9–28.0	10.2–21.2
Fe ₂ O ₃	0.1–0.6	0.1–8.1	0.1–1.3
FeO	5.7–21.6	1.1–8.9	0.5–3.0
CaO	1.9–4.4	33.1–46.5	46.6–51.6
MgO	0.8–2.8	0.2–4.5	0.2–1.1
Содержание стекловидной фазы, %	95–98	85–98	15–85
Содержание кристаллической фазы, %	1–4	1–14	15–82
M ₀ = MgO + CaO/SiO ₂ + Al ₂ O ₃	0.05–0.09	0.60–0.90	1.00–1.10

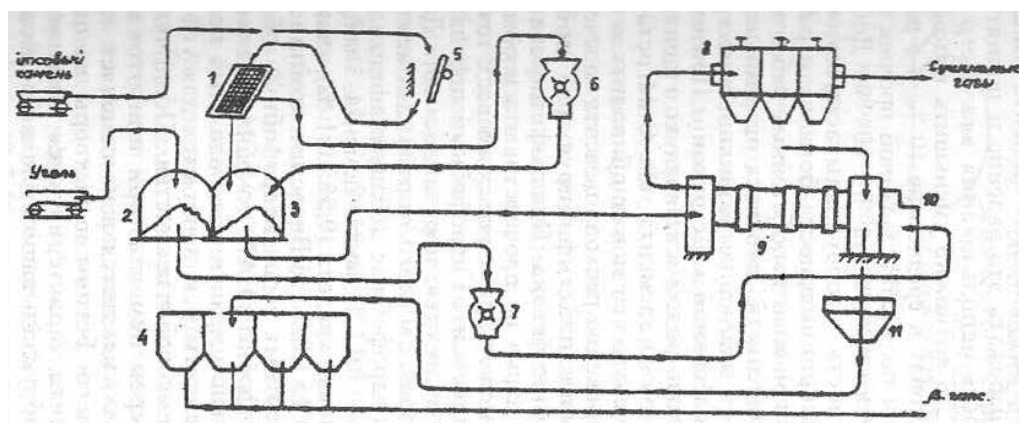
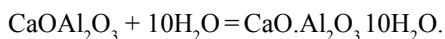


Рис. 3.9. Технологическая линия для производства строительного гипса на угле путем сушки и обжига с применением обжигового барабана

1 – грохот с отверстиями 20...25 мм; 2 – склад угля; 3 – склад дробимого сырья; 4 – бункер склада готовой продукции; 5 – щековая дробилка с шириной разгрузочной щели 120...150 мм; 6, 7 – молотковая дробилка с шириной щели между колосниками 20...25 мм; 8 – электрофильтр; 9 – обжигательный барабан; 10 – топка; 11 – термостатирующий бункер (камера «томления»)

Гидравлическая активность шлаков повышается с возрастанием содержания CaO. Увеличение SiO по отношению к содержанию Al₂O₃ и CaO в свою очередь увеличивает гидравлическую активность материала. Шлаковое стекло, имеющее повышенную растворимость в щелочной среде и высокую внутреннюю энергию, определяет способность шлака проявлять вяжущие свойства. Гидратация шлака происходит в присутствии извести и гипса. Шлаки электротермофосфатные получают при производстве фосфора в электропечах путем быстрого переохлаждения остаточных продуктов, основным компонентом которых является стекло, содержащееся в размерах 95–98 %; Для шлака электрофосфатного существуют ограничения по химическому составу: SiO₂ – не менее 38 %. CaO и MgO – не менее 43 %. P₂O₅ не более 2,5 %. Содержание шлака не должно быть более 20 % в портландцементе с минеральными добавками и в интервале 21–60 % – в шлакопортландцементе. Зола и шлаки топливных электростанций представляют отходы от сжигания энергетических углей. В зависимости от вида применяемых углей и режимов сжигания в котлах свойства зол и шлаков изменяются в широких диапазонах. Нефелиновые шламы образуются при обработке апатито-нефелиновой руды в окись алюминия. При извлечении руды глинозема кремнезем переводится в нерастворимое соединение C₂S. Шлам в высушенном состоянии на 80 % состоит из двухкальцевого силиката. При корректировании состава известью или портландцементным клинкером становится возможным получить нефелиновые цементы. Шлам может быть использован в виде активной

минеральной добавки к портландцементу общестроительному, а также к некоторым видам специальных цемента. Пуццолановый портландцемент является гидравлическим вяжущим, полученным совместным помолом портландцементного клинкера, активных минеральных добавок осадочного (20...30%) или вулканического происхождения (25...40%), а также гипса. Вид применяемой добавки определяет особенности этих цемента. Отличием от обычного портландцемента является пониженное тепловыделение при гидратации, пониженная основность продуктов гидратации, определяющая увеличение водостойкости цементного камня, и устойчивость к агрессивным средам. Особенностью бетонов на этом виде вяжущего является его высокая водонепроницаемость в результате набухания вводимых в цементный камень минеральных добавок. Недостатками пуццолановых портландцементов является повышенная водопотребность вяжущего, приводящая к увеличению расхода цемента, замедленный рост прочности при твердении, пониженная морозостойкость. Пуццолановый портландцемент выпускается марок 300, 400 В гидротехническом строительстве применяется для подводных и подземных сооружений, не подвергаемых действию попеременного замораживания и оттаивания. В наземных конструкциях использование пуццоланового цемента не обеспечивает положительных моментов, так как его воздухоустойчивость ограничена. Шлакопортландцемент содержит в своем составе портландцементный клинкер, 20–60% гранулированного или электротермофосфатного шлака и гипса. До 10% шлака могут быть заменены другим видом активных минеральных добавок. Высокий процент используемых активных добавок повышает экономическую эффективность этого вида вяжущих, в сравнении с традиционным портландцементом его стоимость ниже на 40...50%. Это особенно проявляется в условиях повышения стоимости энергоресурсов на производство вяжущих. Шлакопортландцемент имеет более низкие темпы набора прочности, чем рядовой портландцемент. Регулированием состава шлака и клинкера можно влиять на процесс гидратации. Для этих целей повышается содержание $C_3S + C_3A$ в клинкере при снижении основности шлака. Применение термовлажностной обработки интенсифицирует процесс твердения шлакопортландцемента (пропаривание, автоклавирование), что позволяет получать от 85 до 100% марочной прочности на момент окончания пропарки. В последующем твердении происходит увеличение достигнутой прочности. Цементный камень шлакопортландцемента содержит пониженное количество $Ca(OH)_2$, что определяет высокую стойкость в мягких и сульфатных водах, но его морозостойкость несколько ниже, так как количество химически связанной воды в таких цементах меньше. В процессе гидратации шлакопортландцементов выделяется меньшее количество тепла (в 2–2.5 раза меньше, чем портландцемент), что необходимо при бетонировании массивных гидротехнических конструкций. Шлакопортландцемент применяется в надземных, подземных и подводных частях возводимых объектов. Несколько меньшая воздухо- и морозостойкость в сравнении с портландцементом ограничивает его использование в конструкциях с попеременным замораживанием и оттаиванием. Марки шлакопортландцемента 300, 400, 500. Повышением дисперсности помола смешанного клинкера до 3500–4500 $см^2/г$. дозированием 30...50% шлака и корректировкой состава клинкера быстротвердеющий шлакопортландцемент достигает на третьи сутки твердения прочности 20 МПа. Цемент эффективен в заводском выпуске бетонных и железобетонных изделий с использованием термовлажностной и автоклавной обработок. Благодаря повышенной сульфатостойкости и морозостойкости он рекомендуется для подводных и подземных частей сооружений. Глиноземистый цемент (ГОСТ 969–77) является быстротвердеющим гидравлическим вяжущим, состоящим из низкоосновных алюминатов кальция. Его получают плавлением сырьевой смеси, состоящей из бокситов и известняков, или обжигом такой смеси до спекания. Продуктами обжига являются ряд алюминатов кальция, среди которых определяющим является однокальциевый алюминат $CaO \cdot Al_2O_3 (CA)$. В процессе гидратации происходит образование тонкодисперсных кристаллов десятиводного гидроалюмината:



Последующее твердение приводит к образованию более устойчивых двухкальциевых гидроалюминатов, формирующих основные свойства затвердевшего цементного камня:



Начало схватывания глиноземистого цемента наступает не ранее 30 мин окончания – не позднее 12 ч от момента затворения. Цемент выпускается следующих марок 400, 500, 600. Гидратация алюминатных составляющих сопровождается значительными тепловыделениями на начальных этапах взаимодействия цемента с водой. Особенностью продуктов гидратации – глинозема является отсутствие гидроокиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Это предопределяет повышенную стойкость цементного камня глиноземистого цемента к действию минерализованных вод и многих органических кислот, а также сульфатной агрессии. Благоприятной для твердения является температура не более 25 °С. в этом случае основной продукт гидратации – двухкальциевый гидроалюминат выделяется в виде гексогональных кристаллов. При больших значениях температуры двухкальциевый гидроалюминат переходит в трехкальциевый гидроалюминат кубической формы. Образование новой кристаллизационной структуры сопровождается возникновением внутренних напряжений, при которых прочность снижается в 2–3 раза.

Таблица 3.14

Марки глиноземистого цемента

Марка цемента	Предел прочности при сжатии, МПа	
	Через 1 сутки	Через 3 суток
400	23,0	40,0
500	28,0	50,0
600	33,0	60,0

При бетонировании массивных конструкций на основе глиноземистых цементов температура массива повышается до 60...65 °С, что ослабляет кристаллическую структуру цементного камня. Во избежание такого «сброса» прочности применяют холодную воду затворения и холодные заполнители. Для лучшего отвода тепла осуществляют интенсивный полив бетона водой. Дополнительно в состав глиноземистого цемента вводится гипс в размере 20...25 %, который переводит гидроалюминат в сульфогидроалюминат, устойчивый к действию повышенных температур. Тем самым ликвидируется снижение прочности. Глиноземистый цемент гарантировано набирает прочность в условиях пониженных положительных температур, при отрицательных температурах темпы набора прочности снижаются, однако в сравнении с портландцементом скорость твердения остается выше. Особенность продуктов гидратации глиноземистых цементов определяет жаростойкость бетонов на их основе. Слоистая структура кристаллов гидроалюминатов не разрушается при удалении гидратной воды. В дополнение отсутствует гидрат окиси кальция, который дегидратирует в интервале температур 350–400 °С. Значительная стоимость глиноземистого цемента предопределяет его адресное использование. Данный цемент применяется в скоростных ремонтных и монтажных работах, для скоростного строительства в условиях пониженных температур, для получения жаростойких бетонов. Бетоны на основе глиноземистых цементов имеют высокую коррозионную стойкость и применяются в морских, сульфатных и углекислых водах. Глиноземистый цемент входит в состав расширяющихся цементов. Расширяющиеся и напрягающиеся цементы приготавливаются на основе гидравлических вяжущих с добавками, обеспечивающими увеличение объемных и линейных размеров. Это необходимо для того, чтобы избежать проявления усадочных деформаций и трещин, характерных для обычных вяжущих материалов. В значительных размерах это проявляется в крупных монолитных конструкциях, а также при

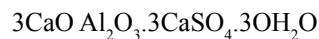
омоноличивании конструкций в стыках и швах, где необходимы непроницаемые материалы. В зависимости от величины расширения цементы делятся на: расширяющиеся с величиной деформаций в 0,03–0,04 % и развиваемым сжимающим усилием в 0,2–0,7 МПа и самонапрягающиеся с расширением свыше 0,25 % и развиваемым сжимающим усилием до 7 МПа. Расширение вызывается введением отдельных окислов (MgO , CaO) или за счет образования в процессе гидратации гидросульфаталюминатов (табл. 3.15.)

Таблица 3.15

Состав расширяющихся цементов

Цемент	Основные компоненты, %	Специальные компоненты, %
Быстротвердевающий расширяющийся	Портландцементный клинкер не менее 69 и не более 75, полуводный гипс 9–11	Сульфаталюминатный компонент 6–20
Напрягающийся	Портландцемент 65–75, гипс 10–15	Глиноземистый цемент 12–20
Гипсоглиноземистый	Глиноземистый цемент 70, двуводный гипс 30	-

При сульфаталюминатном механизме расширения увеличение размеров и объема материала происходит в результате образования гидросульфаталюминатов кальция – этtringита



При правильном использовании компонентов и согласованности структурообразования возможно получить расширение в интервале 4–5 %. Управление процессом расширения заключается в контроле за скоростью и количеством образующегося этtringита при достаточной упругости каркаса цементного камня. При жестком каркасе объемные увеличения этtringита могут привести к снижению прочности цементного камня или его разрушению. Гипсоглиноземистый цемент имеет короткие сроки схватывания, что затрудняет его применение. Введение добавок – замедлителей позволяет получать начало схватывания после 15–25 мин и тем самым создать условия нормальной работы с вяжущим. Расширение обеспечивается как в сухих, так и влажных условиях твердения. После 6 ч твердения глиноземистый расширяющийся цемент водо- и воздухонепроницаем. После 24 ч твердения цементный камень выдерживает избыточное давление 0,5 МПа. Расширяющийся портландцемент имеет начало схватывания не ранее 30 минут, а конец – не позднее 12 ч. Темпы набора прочности при нормальном твердении соответствуют нормальному портландцементу, но при пропаривании при температуре 75–80 °C его прочность в 1,5–2 раза выше, чем у обычного цемента. Расширяющиеся вяжущие используют для бетонов с повышенной водонепроницаемостью, гидроизоляционной штукатурки, заделки стыков в сборных железобетонных элементах. Гипсоглиноземистый цемент с быстрыми сроками схватывания применяют в скоростных ремонтах дефектов и трещин бетона, заливки анкерных болтов и других работах с коротким интервалом выполнения. Напрягающийся цемент предназначен для натяжения арматуры в нескольких направлениях за счет большой химической энергии расширения. Линейные расширения напрягающегося цемента достигают 4 %. Выпускаются три марки напрягающегося цемента: НЦ-2, НЦ-4, НЦ-6. Числовой показатель определяет энергию самонапряжения, зафиксированную в МПа. Сроки схватывания при введении добавок-замедлителей составляют: начало – не ранее 10 мин, конец – не позднее 4 ч. Через сутки прочность составляет не менее 15 МПа, через 28 суток – 50 МПа. Различают напрягающий цемент для растворов и бетонов нормального твердения и растворов тепловлажностной обработки. Область использования напрягающихся цементов – подводные и подземные напорные сооружения повышенной трещиностойкости и газо- и водонепроницаемости, изготовление напорных железобетонных труб, устройства дорожных и аэродромных бетонных покрытий.

3.7. Развитие производства сухих строительных смесей и растворов в России, СНГ и за рубежом

Целесообразность использования сухих смесей, как материала полной заводской готовности, подтверждена зарубежной и отечественной практикой строительства.

В нашей стране производство и применение модифицированных сухих смесей в строительстве только начинает развиваться, о чем свидетельствует низкий объем потребления смеси на душу населения, составляющий менее 2 кг/чел. в год, что значительно меньше, чем в передовых западных странах (в Германии – около 30 кг/чел., в Финляндии и Швеции – около 20 кг/чел., в Венгрии и Польше – 23 кг/чел.). Большая часть применяемых в России модифицированных сухих смесей поставляется в готовом виде из-за рубежа.

Ведущим предприятием данной специализации является производственный комплекс в городе Москве, производящий в настоящее время 52 вида смесей и 250 оттенков цветовой гаммы в объеме 100 тыс. т смесей в год. Кроме этого, в России эксплуатируются порядка 10 заводов на зарубежном оборудовании с производительностью 10...50 тыс. т смесей в год. Лидером в СНГ по выпуску модифицированных сухих смесей стала Республика Беларусь.

В Новосибирской области на базе цементного завода в г. Искитиме создано промышленное акционерное общество АО «Стройсмесь» с целью организации участка по производству сухих строительных смесей и растворов. Сейчас в полуручном варианте выпускаются жесткие смеси М 100, 200, 300 в объеме 10...20 тонн в месяц, пользующиеся повышенным спросом у потребителей – строительных организаций области.

Область применения сухих смесей обширна: выполнение бетонных, штукатурных, кладочных, плиточных работ, устройство покрытий полов, заделка стыков. Кроме этого, предусматривается выпуск сухих смесей для малярных, декоративных и облицовочных работ, при чем для декоративных покрытий сухие смеси будут выпускаться с богатой палитрой цветов, в том числе на пигментах фирмы Bayer и других фирм.

Сухие смеси, по сравнению с товарными, растворными и бетонными, имеют ряд преимуществ:

- выполнение минимума доводочных технологических операций для перевода сухих смесей в рабочее состояние (затворение водой);
- экономия дорогостоящего цемента (на 10–15 %) за счет пластификации и водоудерживания приготовленных растворов;
- использование как при минусовых, так и при положительных температурах, что особенно актуально для сибирского региона;
- снижение отходов растворов на 5–7 % в результате порционного приготовления;
- стабильность составов сухих смесей в результате точной дозировки компонентов и их эффективного смешения;
- повышение производительности труда строителей на 20–25 %, благодаря улучшению пластических свойств приготовленных растворов;
- снижение транспортных расходов на 15 %;
- повышение качества строительных работ при одновременном снижении трудоемкости строительных технологических процессов.

Совместно с лабораториями цементного завода, «Сибкадемстроя» и лаборатории кафедры строительных материалов и специальных технологий НГАСУ проведены испытания и опытное промышленное изготовление жестких цементных растворов М-100, М-200, М-300 с использованием автомобиля «Миксер» для смешивания компонентов, изучены возможности затаривания смесей в мешки МКР – весом 1000 кг, бумажные – весом 50 кг.

Предлагаемые сухие смеси конкурентоспособны, имеют европейский уровень качества при значительно более низких ценах, гарантируют высокое качество строительства, чем и привлекают потребителей.

В настоящее время готова первая очередь проектно-сметной документации строительства участка сухих смесей, ведутся строительные работы. Параллельно планируется произвести и реализовать продукцию в объеме 4000 тонн, а в 1998 году – 12000 тонн (или 1000 тонн) в месяц.

Немецкая фирма «WACKER», являющаяся ведущей в мире по производству полимеров Виннапас, диспергирующих порошков, оказала и оказывает значительную помощь в передаче богатой научной базы по составам и производству сухих смесей. С 1996 года на Кузбасской ярмарке были заключены договора на развитие нового направления – сухие строительные полуфабрикаты. Данная фирма является также основным поставщиком полимеров, при наличии которых у строительных сухих смесей и растворов появляются особые свойства, позволяющие коренным образом менять технологию строительных работ, увеличивать прочность и производительность труда с повышением культуры производства.

В настоящее время сухие строительные растворы в Новосибирске производят следующие фирмы: ЗАО «Стройсмесь», ОАО «Предприятие отделочных материалов», ЗАО «ЖБИ-4 С АС», ООО «Геркулес и К⁰». Основными поставщиками импортной продукции по новосибирскому региону являются фирмы: «Ланселот», «Элко», «Мастер Класс», «Бинелли», «Атлас» и т. д.

Применение полимеров фирмы «WACKER» в растворах и смесях позволяет придать новой продукции следующие свойства:

- хорошую адгезию и эластичность;
- такие специальные свойства, как фиксирующие или разжижающие, водоудерживающие, гидрофобные и т. д.;
- морозоустойчивость при транспортировке и хранении в сухом виде;
- простота упаковки продукции и утилизации тары.

3.8. Общие сведения о технологии производства сухих смесей и растворов

3.8.1. Виды сухих смесей и растворов

Ассортимент сухих строительных смесей, выпускаемых предприятиями г. Новосибирска, довольно обширен и представлен следующими видами, которые можно разделить на:

- строительные (пескобетоны М 100, 200, 300; кладочные М 75,50; штукатурные М 25, 10);
- клеевые (для наклейки кафеля, мрамора, гранита, ПСБС, кирпича, ячеистых бетонов);
- декоративные (цветные фасадные водостойкие, фуговочные, для заделки швов кафельной плитки; обычные и цветные шпаклевки);
- специальные (огнезащитные составы ОПВ-1, теплые штукатурки и кладочные растворы с заполнителем (вермикулитом);
- наливные (самовыравнивающиеся, с водоудерживающими, водоотталкивающими свойствами); герматизирующие шламы.

По приданию свойств сухие смеси можно разделить на классы по видам добавок:

- обычные растворы (глины, ЛСТМ и т. д.);
- с полимерами Виннапас;
- с диспергируемыми порошками на основе КМЦ по технологии ИХТИМС;
- с целлюлозными продуктами Габроза Х 220.

Обычные строительные растворы выполнены согласно ГОСТ 28013–89 с применением ЛСТМ – 2 (ГОСТ 13–287), цементной пыли и отходов производства мукомольной и текстильной промышленности. Подбор дешевых высокоэффективных пластифицирующих добавок на данный период является одной из важнейшей задачи с целью получения более дешевых строительных смесей, пользующихся большим спросом у строителей.

Решающий технологический прогресс во многих областях строительной индустрии принесли этиленсодержащие порошки Виннапас, выпускаемые с 1957 года и используемые в производстве сухих строительных смесей, способствующие улучшению их качества.

В направлении получения диспергируемых порошков из КМЦ ведутся работы Российскими учеными института Химии твердого тела. Ломоновский О. И. и его коллеги разработали близкие технологии получения диспергируемых материалов по так называемому материалу-ведческому направлению. Физико-химический смысл процесса заключается в механической обработке смеси двух твердых веществ, при которой одно вещество распространяется на поверхности другого вещества и образует оболочковый композит. Диспергируемые порошки были получены путем обработки кальцита слоем карбоксилитилцеллюлозы.

Одним из близких по свойствам порошкам является производственная целлюлоза Габро-за Х 220, предлагаемая Нидерландской фирмой АКЗО КемиКЛЗ Интернейшнл и используемая для штукатурных растворов и наполнителей строительного гипса.

Очень интересными разработками ЗАО «Стройсмесь» являются теплые растворы с наполнителем вспученного вермикулита, производство по выпуску которого начат с декабря 1997 г.

3.8.2. Требования, предъявляемые к сухим смесям

Стандарт (ГОСТ 28013–89) распространяется на растворы строительные, применяемые для каменных кладок, облицовочных и штукатурных работ в различных эксплуатационных условиях.

Стандарт устанавливает технические требования к растворам строительным и материалам для их приготовления.

1. Растворы строительные подразделяют по виду вяжущих на простые с использованием одного вида вяжущего (цемент, известь, гипс и др.) и сложные с использованием смешанных вяжущих (цементно– известковые, известково-золевые, известково-гипсовые и др.).

Основными показателями качества растворной смеси являются; подвижность, водоудерживающая способность, расслаиваемость, средняя плотность.

В зависимости от подвижности растворные смеси подразделяют на марки: П_к 4, П_к 8, П_к 12 и П_к 14,

Водоудерживающая способность свежеприготовленной растворной смеси, определяемая в лабораторных условиях, должна быть не менее:

90 % – для растворных смесей,готавливаемых в зимних условиях;

95 % – для растворных смесей,готавливаемых в летних условиях.

Водоудерживающая способность растворной смеси, определяемая на месте производства работ, должна быть не менее 75 % водоудерживающей способности, установленной в лабораторных условиях.

Расслаиваемость свежеприготовленной растворной смеси должна быть не более 10 %.

Отклонение средней плотности растворной смеси в сторону увеличения допускается не более 10 % от установленной проектом. При применении воздухововлекающих добавок снижение плотности не должно превышать 6 %.

Составы растворных смесей должны подбираться таким образом, чтобы обеспечить получение растворных смесей с заданными свойствами при наименьшем расходе вяжущего.

Сухие растворные смеси, изготовленные в заводских условиях, должны быть с влажностью не более 0,1 % по массе.

При приготовлении растворных смесей дозирование вяжущих и заполнителей должно производиться по массе, а воды и добавок в жидком виде – по массе или по объему и корректироваться при изменении свойств, входящих в состав растворной смеси материалов. Погрешность дозирования не должна превышать:

- + 2 % – для вяжущих, воды, сухих добавок, рабочего раствора жидких добавок;
- + 2,5 % – для заполнителей.

Дозировочные устройства должны отвечать требованиям ГОСТ 10223. Температура растворов, применяемых в зимний период, должна быть не менее 5 °С. Вода для затворения растворов должна иметь температуру не более 80 °С, а с добавками полимеров и метилцеллюлозы – не более 70 °С.

Растворные смеси должны готовиться в смесителях циклического или непрерывного типа, гравитационного или принудительного действия.

Основными показателями качества раствора являются: прочность при сжатии, морозостойкость, средняя плотность.

Прочность раствора характеризуют марками по прочности на осевое сжатие в возрасте 28 суток. Марку прочности раствора на осевое сжатие назначают и контролируют во всех случаях. Для раствора установлены следующие марки по прочности при сжатии: М 4, М 10, М 25, М 50, М 75* М 100, М 150, М 200.

Для растворов, подвергающихся попеременному замораживанию и оттаиванию, в увлажненном состоянии в конструкциях зданий и сооружений назначают и контролируют марки по морозостойкости: F 10, F 15, F 25, F 35, F 50, F 75, F 100. Растворы должны удовлетворять требованиям по морозостойкости, установленным проектом.

По средней плотности растворы подразделяют на: тяжелые (со средней плотностью 1500 кг/м³ и более), легкие (со средней плотностью менее 1500 кг/м³). Отклонение средней плотности раствора допускается не более 10 % от проектного.

2. Материалы, применяемые для приготовления растворных смесей, должны удовлетворять техническим требованиям настоящего стандарта.

Цемент для приготовления растворных смесей должен удовлетворять требованиям ГОСТ 25328 или ГОСТ 10178, известь – ГОСТ 9179, гипс – ГОСТ 125, песок – ГОСТ 8736, песок из шлаков тепловых электростанций – ГОСТ 26644, зола – унос – ГОСТ 25818, зола гидроудаления ТУ 34–31–16502, вода для затворения растворных смесей и приготовления добавок ГОСТ 23732, шлак доменный ГОСТ 3476.

В зависимости от вида и назначения строительных растворов следует применять различные виды заполнителя. Влажность заполнителей и температуру смеси определяют при подборе и корректировке состава.

В качестве заполнителя в штукатурных растворах следует применять песок для строительных работ с модулем крупности от 1 до 2. Содержание зерен размером свыше 2,5 мм в песках, применяемых в штукатурных растворах, не допускается. В растворах для отделочного слоя не допускается наличие зерен песка крупностью свыше 1,25 мм.

Песок и зола, применяемые для приготовления раствора, не должны содержать смерзшихся комьев размером более 1 см, а также льда.

При подогреве песка его температура должна быть не выше 60 °С.

Для легких растворов в качестве заполнителя следует применять пористые вспученные пески (вермикулитовые, перлитовые, керамзитовые, шунгизитовые, из шлаковой пемзы, аглопоритовые, золу-унос, зольный компонент золы гидроудаления золошлаковой смеси).

Для декоративных растворов могут применяться различные заполнители, например, мытые кварцевые пески и крошка дробленых горных пород (гранитная, мраморная, керамическая, угольная, пластмассовая) крупностью зерен не более 2,5 мм. Для цветных штукатурок, используемых на фасадах, в интерьерах, допускается применять гранитную, стеклянную, керамическую, угольную, сланцевую, пластмассовую крошку размером частиц 2...5 мм.

Для приготовления цветных цементно-песчаных штукатурных растворов следует применять цветные цементы по ГОСТ 15825, природные или искусственные пигменты по ГОСТ 8135, ГОСТ 18172, ГОСТ 12966.

Для получения подвижных и нерасслаиваемых растворных смесей, а также для ускорения роста прочности раствора, повышения морозостойкости и др., в их состав должны вводиться различные виды добавок и комплексы на их основе.

Выбор их должен производиться в зависимости от требуемых проектных характеристик растворных смесей. Химические добавки не должны вызывать вредных последствий в период эксплуатации зданий (разрушения материалов, коррозии арматуры, высолов и т. п.). Количество добавки устанавливают опытными замесами в лабораториях.

3.8.3. Способы производства

В зависимости от назначения растворных смесей и рецептур изготовление их осуществляется в заводских условиях с использованием комплекса оборудования, которыми оснащены бетонорастворные узлы. Технология производства сухих смесей складывается из следующих технологических операций: поступающий с карьера песок или гравийно-песчаная смесь подвергается тепловой обработке в сушильных агрегатах, где их влажность доводят до 0,5 %, затем производят рассев на ситах до нужных фракций. Просеянный песок после дозирования направляется в смеситель принудительного действия. В этот же смеситель загружают и другие компоненты в необходимом количестве. Компоненты дозируют по массе с помощью весовых дозаторов. Отдозированные материалы перемешивают до получения однородной массы. Полученную смесь затаривают в емкости, необходимые для реализации и подают на склад готовой продукции. Если затаривание не предусмотрено, то смесь сразу поступает в бункер склада готовой продукции. Такая технологическая схема получения сухих смесей осуществляется при применении песков мелкой и очень мелкой фракции.

При использовании песков средних фракций, а возможно и крупных, их необходимо дополнительно измельчать как самостоятельно, так и совместно с цементным клинкером или готовым цементом. Последующие технологические операции те же, что и при использовании мелких песков.

Смеси хранят в сухом месте, а модифицированные полимерами при температуре не выше 40 °С.

Схема технологии производства данного продукта приведена на рис. 3.10.

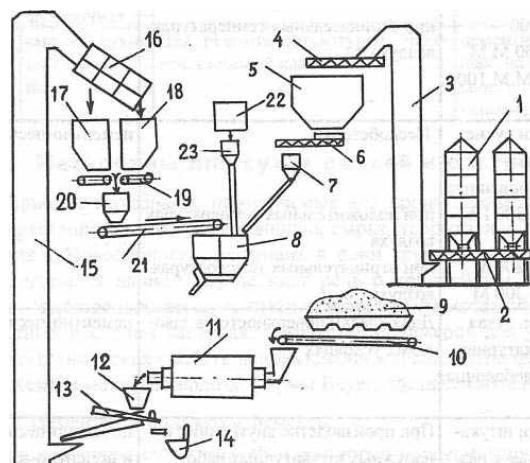


Рис. 3.10. Схема приготовления сухой смеси:

1 – силос цемента; 2, 4, 6 – шнековые питатели; 3 – элеватор; 5 – расходный бункер; 7, 20, 23 – дозатор; 8 – смеситель непрерывного действия; 9 – склад песка; 10 – ленточный конвейер; 11 – сушильный барабан; 12 – бункер накопитель; 13 – грохот; 14 – емкость с отходами песка; 15 – элеватор; 16 – сито – бурат для песка; 17, 18 – расходные бункера песка разных фракций; 19 – ленточный питатель; 21 – дополнительный питатель; 22 – емкость добавок.

3.8.4. Область применения

Область применения выпускаемого ассортимента сухих строительных смесей представлена в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Ассортимент сухих строительных смесей

№ п/п	Тип смеси	Назначение смеси	Примечание
1	2	3	4
1	Смеси монтажные М200 М150 М100 М200 М М150 ММ100 М	Применяются для производства монтажных и кладочных растворов при положительных температурах окружающей среды. То же, при отрицательных температурах воздуха.	Рецепты составлены на основе ПЦ-400 (цементно-песчаные)
2	Смеси сухие специализированные ПБ-200 ПБ-300 ПБ –200 М ПБ-300 М	Пескобетоны при положительных температурах воздуха при отрицательных температурах воздуха	цементно-песчаные
3	Смесь сухая штукатурная (бездобавочная)	Для отделки поверхностей в заводских условиях	цементно-песчаные
4	Смеси штукатурные с различными видами добавок	При производстве внутренних и наружных штукатурных работ вручную	цементно-песчаные и цементно-известково-песчаные
5	Смеси штукатурные	Для устройства стяжки пола вручную	цементно-песчаные
6	Смеси сухие	Для укладки плитки	цементно-песчаные
7	Смеси сухие штукатурные изоляционные	Для штукатурных работ вручную на мокрых и засоленных стенах	цементно-песчаные
8	Смесь сухая штукатурная ремонтная	Для производства штукатурных ремонтных работ на слабом основании	цементно-песчаные
9	Смеси сухие штукатурные декоративные	Для производства отделочных фасадных и внутренних работ в ручную	цементно-известково-песчаные
10	Смесь сухая штукатурная фуговочная	Для заделки стыков при укладке плитки	цементно-песчаные
11	Смеси сухие шпаклёвочные	Для ремонта штукатурки, панелей, стеновой кладки	Цементосодержащая; на основе гипсового вяжущего; гипсомеловая

Таблица 3.17

Химический состав портландцемента

Наименование	Содержание, по массе на сухое						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	ПП
Чернореченский портландцемент	22,03	6,78	3,24	59,77	2,88	2,62	1,64

Примечание. В клинкере содержится 2,93R₂O.

Минералогический состав клинкера представлен минералами в% по массе: C₃S – 57...62; C₂S – 15...17; C₃A = 8,5...9,5; C₄AF = 11...14; CaO свободный до 1 %; FeO – до 0,2 %. Удельная поверхность составляет 3330 см²/г, что соответствует требованиям ГОСТ. По минералогическому составу Чернореченский портландцемент (ПД 400 – Д 20) является алитовым с большим содержанием C₃A + C₄AF, т.е. высокоэкзотермичным.

Гипс

Научно-производственное предприятие «Гипс» на данный момент выпускает гипс строительный двух марок Г3 и Г4, имеющий прочность при сжатии соответственно 3 и 4 МПа,

а прочность на изгиб 2 МПа. По тонкости помола гипс строительный относится к среднему помолу (остаток на сите 02 составляет до 14 %), а по срокам схватывания к нормальноотвердеющему: начало схватывания через 6 минут и конец – не позднее 30 мин.

Применение строительного гипса в производстве гипсопесчаных растворов позволяет улучшить технологические свойства. Но адгезионная связь с основой улучшается благодаря введения в смеси дисперсионных порошков Виннапас; в чистом виде прикреплению гипсо-известковых растворов к основам затруднительно.

Кварцевый песок

Песок используется нескольких месторождений: речной – Обского карьера, карьера «Криводановский» и песчано-гравийная смесь Чернореченского завода.

Испытание физико-технических свойств песка проводилось в соответствии с требованиями ГОСТов 8736–93. Кроме того, по методу Рутковского в кварцевом песке было определено содержание глинистых включений. Этот метод основан на способности глинистых частиц набухать в воде и на различной скорости падения частиц в воде в зависимости от их размера. По гранулометрическому составу песок относится к пескам мелкой группы. Зерновой состав песков следующий табл. 3.18.

Таблица 3.18

Зерновой состав песков

Наименование песков	Остаток на ситах в %						
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
1. Обской	2,0–2,5	1,5–4,0	4,0–5,0	13,5–4,5	47,5–52	29,0–30	2,5–3,5
2. Карьер «Криводановский»	0,1–3,5	0,2–8,0	0,2–5,0	1,9–20	21,5–46,5	17,5–65,4	4,5–22,5
3. Гравийнопесчаная смесь	17,0–21,0	3,6–12,4	3,6–10,2	11,8–22,3	39,6–55,0	16,0–26,0	0,4–0,8

По внешнему виду песок мелкозернистый, светло-серого цвета со слабым желтоватым оттенком. Под микроскопом видны зерна кварца с окатанной поверхностью, полевого шпата, кальцита и небольшого количества илистых и глинистых агрегатов (2,5...3,5 %). Калориметрическая анализ на содержание в песках органических примесей показал пригодность их для применения в растворах.

Вермикулит

Вспученный вермикулит, используемый для приготовления строительных растворов, производится из природного материала (вермикулита), содержащего кремнезем, окись магния и др. при температуре 900–1000 °С. Важнейшими особенностями вспученного вермикулита является низкая насыпная плотность и высокие тепло- и звукоизоляционные свойства. Использование вспученного вермикулита в цементном растворе оказывает положительное влияние на коррозионную стойкость и трещино-стойкость цементного камня в условиях перекристаллизации новообразований и воздействия агрессивных вод. Кроме того, гидрофильные частицы вспученного вермикулита обладают свойствами твердой смазки за счет скольжения их микропластин, что способствует снижению гидродинамических сопротивлений. На основе вермикулита была получена смесь с цементом (ПЦ 400), которая может быть использована для строительных растворов, у которой предел прочности при сжатии, в зависимости от грансостава вермикулитового песка, составляет от 9,5 до 11 МПа. Введение дополнительного количества гранулированного шлака или золы не дает существенных результатов (7,5...9,5 МПа). Кроме того, были получены штукатурные растворы с плотностью 500...600 кг/м³ и прочностью при сжатии 1...1, –5 МПа. Слой такого раствора толщиной 20 мм эквивалентен по тепловому сопротивлению кирпичной стене толщиной 150 мм.

Полимеры

Впервые было обнаружено, что при введении в минеральные вяжущие вещества некоторых природных органических продуктов они приобретают большую прочность. В 1932 году описано применение химически синтезированного полимерного термопластичного латекса для модификации цементных растворов и бетонов. Водные дисперсии добавлялись на стройках при замесе строительных растворов с водой. Применение в достаточных объемах порошкообразных термопластических полимеров, так называемых дисперсионных порошков, началось в 60-х годах. Виннапас – это товарная марка термопластичных полимеров фирмы Ваккер-Хеми. В настоящее время Новосибирская фирма „Стройсмесь” является потребителем данного материала при производстве сухих смесей. Фирма Ваккер-Хеми производит и поставляет сополимерные дисперсионные порошки на основе винилацетата, этилена, винилхлорида, виниллаурата, акрилата и других мономеров с температурой пленкообразования около 0°С, а также модифицированные силанами порошки для повышенного гидрофобного эффекта.

Пигменты

Пигменты – порошкообразные красящие материалы, способные в смеси с жидким связующим образовывать красочные составы и в то же время не растворяться в связующем. От них зависит не только цвет, но и долговечность покрытия. Подобно заполнителю в строительных растворах и бетонах, пигмент уменьшает усадочные деформации пленочного покрытия при ее твердении („высыхании”). Искусственные пигменты с большой красящей способностью разбавляют белым тонкодисперсным наполнителем, что удешевляет красочный состав. Наполнители: мел, молотый известняк или гипс, тальк, не снижающие атмосферостойкости покрытия. Искусственные минеральные пигменты получают путем термической обработки минерального сырья. Для получения природных минеральных пигментов производят механическую обработку природных материалов: помол, просев или отмучивание. Пигменты выпускают как в сухом порошкообразном состоянии, так и в виде паст – концентратов, эмульсий и микрокапсул. Запрещено применение токсичных пигментов, содержащих в своем составе, например, свинец. На качество покрытия и его основные свойства также влияет дисперсность пигмента: чем тоньше частицы, тем выше укрывистость и красящая способность. Полидисперсный состав пигмента позволяет получить плотное покрытие при минимальном расходе связующего. Пигменты, применяемые в фасадах зданий, должны обладать свето-, водо- и щелочестойкостью. Они могут быть составным компонентом для белых портландцементов. Для серых портландцементов пигменты, как правило, не применяются. Одним из ведущих зарубежных поставщиков пигментов для сухих строительных смесей является фирма Bayer (Германия).

3.9. Сухие смеси в строительном производстве (рецепты)

3.9.1. Отделочные материалы

В качестве отделочных материалов для производства строительных работ в России и на стройках Новосибирской области применяются материалы на основе сухих смесей с введением в их состав полимерных композиций, повышающих физико – технические свойства покрытий. К таким отделочным материалам можно отнести различного рода жесткие сухие строительные смеси, шпаклевки, фасадные смеси, герметизирующие шпалы.

Сухие строительные смеси (жесткие) состоят из следующих компонентов:

раствор М-100

- цемент – 260...300 кг,
- песок – 1420...1600 кг
- ЛСТМ – 2–0,2...0,5 % от Ц
- вода

раствор М-200

- цемент – 470...560 кг,
- песок – 1270...1400 кг
- ЛСТМ – 2–0,2...0,5 % от Ц
- вода

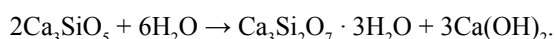
раствор М-300

- цемент – 590...670 кг,
- песок – 1245...1280 кг
- ЛСТМ – 2–0,2...0,5 % от Ц
- вода

Нормы расхода материалов составлены с учетом следующих их характеристик и требований ГОСТ 28013–89. При производстве сухих смесей возможно применение шлакопортландцемента и портландцемента М 400, удовлетворяющих требованиям ГОСТа 10178–85.

3.10. Строительно-технические свойства портландцемента

Твердение цемента, т.е. его превращение после смешивания с водой (затворения) вначале в пластичное тесто, затем потеря тестом пластичности (схватывание) и его последующее твердение (формирование искусственного камня), является сложным и многостадийным физико-химическим процессом, основанным на химическом взаимодействии фазовых составляющих цемента и воды (гидратации цемента). В ходе гидратации цемента безводные клинкерные минералы – силикаты, алюминаты и алюмоферриты кальция – превращаются в соответствующие кристаллогидраты – гидросиликаты, гидроалюминаты, гидроферриты кальция, гидроксид кальция. Например, гидратация главной фазы портландцемента – алита, являющегося носителем основных свойств и определенным «символом» портландцемента, происходит по следующей условной схеме реакции гидролитического разложения:



При обычных условиях твердения ~70 % C3S гидратируется за 28 сут, а полная гидратация может наступить через 1 год и более. Продуктами этой реакции являются слабозакристаллизованный (почти аморфный) гидросиликат кальция, обладающий свойствами геля, и гидроксид кальция (СН). По аналогичной схеме гидратируется другой силикат кальция портландцемента – белит (C2S), однако его гидратация протекает медленнее (степень гидратации за 28 сут ~ 30 %), и в результате гидролиза образуется меньше СН. Составы гидросиликатов кальция (аморфных или слабозакристаллизованных продуктов), образующихся при гидратации C2S и C3S, фактически не соответствуют каким-либо определенным соединениям, а имеют обширную область составов, обозначаемую общим понятием – гель С-S-Н. Поскольку портландцемент является полиминеральным продуктом и, кроме силикатов кальция, содержит алюминатные, ферритные и сульфатные фазы, реальный состав продуктов гидратации цемента еще более сложен и представляет собой тонкую смесь С-S-Н и групп фаз AFm и AFt – продуктов гидратации и взаимодействия алюминатных, ферритных и сульфатных фаз. Иногда продукты гидратации цемента называют цементным гелем, хотя этот продукт содержит, кроме действительно слабозакристаллизованных гидросиликатных и гидроалюминатных фаз, достаточно крупнокристаллический Ca(OH)2 (портландит). В об-

шем случае модель структуры цементного камня состоит из трех компонентов: непрореагировавших с водой полиминеральных частиц исходного цемента, цементного геля и пор разного размера (пор геля и капиллярных пор), заполненных воздухом или водой. Структура цементного камня включает также воздушные поры (пустоты), возникающие при перемешивании цементного теста, а также контракционные (усадочные) поры, образовавшиеся из-за уменьшения суммарного объема твердеющей системы цемент – вода. Капиллярные поры имеют размер от 10 нм до 100 мкм и различаются по форме, образуя на ранних стадиях гидратации взаимосвязанную систему, распределенную по цементному камню. Капиллярные поры – это та часть общего объема системы цемент – вода, которая не заполнена продуктами гидратации. Капиллярная пористость зависит от водоцементного отношения (В/Ц) исходной смеси и от степени гидратации цемента. Поскольку абсолютный объем продуктов гидратации в 1,5...2 раза превышает объем исходных негидратированных фаз, эти продукты занимают часть начального порового пространства, и по мере гидратации цемента объем капиллярных пор уменьшается. При достижении определенной степени гидратации цементный гель блокирует капиллярные поры в формирующейся структуре, поскольку размер пор цементного геля (1,5...2 нм) на несколько порядков меньше размера капиллярных пор. Поры занимают около 28% общего объема цементного геля, а объем капиллярных пор может составлять до 40% и более в зависимости от В/Ц, характеристик цемента, условий твердения и т. д.

Характеристики используемого цемента, особенности процессов гидратации цемента и условия формирования структуры твердеющей системы определяют комплекс строительно-технических свойств на всех стадиях применения цемента и его последовательного превращения по схеме:

Цемент → цементное тесто → цементный камень (порошок) (растворная, бетонная смесь) (раствор бетон)

Кроме фазово-химического и вещественного состава (см. разд. 2.1), важной характеристикой цемента является его **гранулометрический состав** – размер частиц (тонкость помола цемента). Нормируемая характеристика (ГОСТ 10178) – тонкость помола цемента, соответствующая проходу через сито с сеткой № 008 (80 мкм) не менее 85% массы просеиваемой пробы. В большинстве случаев такой характеристики для прогнозирования свойств цемента недостаточно, поэтому пользуются величиной удельной поверхности, определяемой по методу воздухопроницаемости (поверхностемеры Товарова, Блейна). Рядовые цементы (марки 300...400) имеют удельную поверхность 250...350 м²/кг, а высокомарочные и быстротвердеющие (марки 500 и выше) – 350...550 м²/кг. Наиболее информативным показателем дисперсности цемента является его гранулометрический состав, включающий определение содержания частиц всех фракций в пределах от 0 до 80 мкм и более, представляемый в виде кривой распределения частиц по размерам (рис. 8).

Плотность цемента (эффективная или пикнометрическая) как характеристика полиминерального продукта определяется плотностью входящих в его состав компонентов и находится в пределах 2,8...3,2 г/см³, приближаясь к верхнему пределу для чисто клинкерных (бездобавочных) цементов и снижаясь до нижней границы для пуццолановых цементов. **Насыпная плотность** цемента зависит от тонкости помола и степени уплотнения и может составлять 1200...1800 кг/м³.

Воздухостойкость цемента, т. е. его способность сохранять декларируемый производителем уровень свойств (марку цемента, активность, сроки схватывания и др.) при длительном хранении на

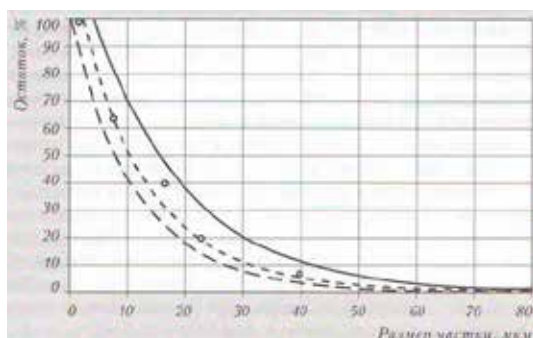


Рис. 3.11. Гранулометрический состав портландцемента -PZ 32,5;-PZ 42,5;-PZ 52,5

воздухе, зависит от способа и условий транспортирования и хранения цемента до его использования. Ухудшение свойств цемента при его хранении связано с процессами гидратации и карбонизации цементных минералов и определяется относительной влажностью воздуха и типом хранилища. В герметичной упаковке (например, в полиэтиленовых мешках) свойства цемента не меняются достаточно долго (год и более), тогда как при хранении в открытом виде потеря активности может составить 10...20% за 3 месяца хранения. Потеря активности более заметна для высокопрочных и быстротвердеющих тонкомолотых цементов, поэтому ГОСТ 10178 устанавливает гарантийный срок хранения цементов после отгрузки при поставке в таре 45 сут для быстротвердеющих и 60 сут для остальных типов цементов, а при поставке навалом – на момент получения цемента потребителем, но не более 45 сут после отгрузки для быстротвердеющих и 60 сут – для остальных цементов.

Водопотребность цемента – минимальное количество воды, требуемое для получения теста определенной пластичности, оценивается по погружению пестика прибора Вика (ГОСТ 310) и выражается количеством воды в% от массы цемента, необходимой для получения цементного теста нормальной густоты. Эта характеристика зависит от вещественного состава цемента (количества и вида гидравлических или инертных добавок), тонкости помола цемента и фазового состава клинкера. Водопотребность цементов (значение нормальной густоты) увеличивается при переходе от бездобавочных цементов к цементам с минеральными добавками и к цементам, содержащим большое количество добавок (ППЦ, ШПЦ), от 25... 27% до 31...33%. Повышение тонкости помола цемента также увеличивает его водопотребность, влияние фазового состава клинкера менее заметно, однако увеличивается при переходе от низкоалюминатных цементов к высокоалюминатным. Эффективным способом снижения водопотребности цементов является применение добавок-водопонизителей – пластификаторов, суперпластификаторов, гиперпластификаторов.

Сроки схватывания цемента – время потери пластичности цементного теста нормальной густоты, определяемое по погружению иглы прибора Вика (ГОСТ 310). Этот показатель для портландцемента нормируется по ГОСТ 10178 как начало схватывания (не ранее 45 мин) и конец схватывания (не позднее 10 ч) и является для ССС важным параметром, поскольку он связан с таким свойством смесей, как живучесть. Цементы, сроки схватывания которых выходят за нормируемые пределы, относятся к быстросхватывающимся или, в некоторых случаях, к цементам с ложным схватыванием. Определенные неудобства вызывает применение медленно схватывающихся цементов (конец схватывания более 4...5 ч).

Быстрое схватывание цементов упрощенно можно свести к мгновенной гидратации фазы C_3A , которая замедляется при взаимодействии с гипсом, присутствующим в цементе. При недостатке гипса быстрое схватывание цементного теста приводит к необратимым последствиям – загустеванию смеси, что делает ее непригодной для практического использования. Более сложная картина наблюдается при проявлении цементом признаков ложного схватывания: цементное тесто вначале очень быстро схватывается, однако затем при интенсивном перемешивании, без добавления дополнительного количества воды, вновь разжижается. Приемы такого интенсивного перемешивания растворных или бетонных смесей при промышленном использовании цемента не предусмотрены, и практическое применение цементов с явлением ложного схватывания либо невозможно, либо вызывает большие осложнения. Если основной причиной быстрого схватывания является недостаток гипса в цементе, то появление ложного схватывания, как правило, связано с технологическими нарушениями (например, высокой температурой при помоле цемента), и производитель цемента не должен отгружать цемент с признаками ложного схватывания. Методика определения этой характеристики цемента приведена ниже.

С учетом изложенного факторами, определяющими сроки схватывания портландцемента, являются:

- вещественный состав цемента (присутствие в цементе гидравлических или инертных добавок замедляет схватывание);
- минералогический состав клинкера (цементы на основе высокоалюминатных клинкеров схватываются быстрее);
- тонкость помола цемента (чем тоньше размолот цемент, тем, при прочих равных условиях, он быстрее схватывается);
- содержание в цементе щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O} = \text{R}_2\text{O}$). При высоком содержании щелочей ($> 1,0\%$) сроки схватывания сокращаются, что может быть причиной быстрого схватывания даже при предельно разрешенном содержании гипса ($4\% \text{SO}_3$);
- сроки схватывания цемента удлиняются при увеличении количества воды затворения и при снижении температуры твердения.

При использовании ССС может возникнуть необходимость дополнительного регулирования сроков схватывания и обеспечения заданной живучести смеси. В этом случае применяют систему специально разработанных добавок – как ускорителей, так и замедлителей схватывания (глава 4).

Одним из практических способов регулирования сроков схватывания ССС, является использование смесей портландцемента и алюминатных цементов (глиноземистых, высокоглиноземистых). Смесь таких цементов при определенных соотношениях быстро схватывается и быстро набирает прочность в ранние сроки, правда, в ущерб конечной прочности изделий. Такие смеси используются при разработке составов самонивелирующихся полов, некоторых видов шпатлевок, гидроизоляционных материалов и др. Более подробно этот вопрос изложен в разд. 6.6. Следует также учитывать влияние на сроки схватывания сухих смесей всех компонентов их вещественного состава, прежде всего эфиров целлюлозы, пластификаторов, РПП.

Деформации при твердении цемента. Объем твердеющего цементного камня близок к объему исходного цементного теста (растворной, бетонной смеси), однако цементный камень все же подвержен небольшим деформациям усадки или деформациям набухания. Если линейные деформации не превышают ориентировочно $0,2\%$, они, хотя и вызывают внутренние напряжения, не приводят к появлению в цементном камне видимых трещин.

Причины деформаций цементного камня могут быть внутренними, т.е. связанными с химическими превращениями компонентов твердеющего цемента, или внешними, возникающими при действии на цементный камень окружающей среды (температуры, влажности, химических веществ, растворенных в воде или воздухе). Внутренние причины деформаций должны находиться под контролем производителя цемента, который гарантирует отсутствие их отрицательных проявлений. Цемент должен удовлетворять требованию равномерности изменения объема при твердении (ГОСТ 10178). Факторы, вызывающие неравномерность изменения объема цемента (повышенное содержание в клинкере несвязанного оксида кальция, периклаза, а также передозировка гипса), контролируются в соответствии с технологической картой предприятия-изготовителя цемента. Более сложная ситуация складывается с внешними причинами опасных деформаций цементного камня: они должны находиться под контролем производителя строительных работ (на стадии строительства) и под контролем организаций, эксплуатирующих строительный объект. Отсутствие такого контроля может привести, в неблагоприятных условиях, к ослаблению конструкции или даже к ее разрушению. Примером таких деформаций может быть высыхание цементного камня на ранних стадиях гидратации, взаимодействие цементного камня с заполнителями, содержащими активный кремнезем, проникновение воды в строительную конструкцию с последующим выносом на поверхность солей, замерзание воды в конструкции, „химическая коррозия” под действием окружающей среды и др. Большинство из этих факторов определяют **долговечность** цементного камня, т.е. его способность сохранять необходимый уровень свойств длительное время в процессе эксплуатации.

Усадка – это естественное свойство цементного камня (раствора, бетона), выражающееся в уменьшении его объема и массы при высыхании. При первичной потере влаги цементным его образцом необратимые деформации усадки составляют 30...50 % от общей усадки. При последующем переменном увлажнении и высыхании наблюдаются обратимые знакопеременные деформации усадки-набухания. При усадке в пределах до 0,2 % в цементном камне нет видимых трещин, при больших деформациях наблюдаются характерные усадочные трещины, свидетельствующие о трещиностойкости цементного камня.

Усадку цементного камня связывают со следующими явлениями: при относительной влажности 45...90 % преобладают вызывающие усадку напряжения, связанные с испарением воды из капилляров определенного размера, при относительной влажности менее 20 % и удалении адсорбированной воды преобладает эффект поверхностного сжатия твердой фазы. Другой составляющей усадки при высыхании цементного камня является нарушение ион-дипольного взаимодействия при удалении молекул воды как из пространства между частицами, так и потеря межслоевой воды C-S-H гелем.

Основные факторы, влияющие на величину усадки цементосодержащих материалов при высыхании, следующие:

- повышенное количество цемента в растворах и бетонах;
- усадка в большей степени проявляется при твердении и службе изделий в условиях повышенной температуры и низкой относительной влажности;
- цементы, особенно тонкомолотые ($S > 500 \text{ м}^2/\text{кг}$), проявляют большую склонность к усадке;
- увеличение значения В/Ц при прочих равных условиях приводит к росту усадочных деформаций: минералогический состав клинкера незначительно влияет на усадочные деформации, хотя имеется тенденция к их возрастанию при переходе к высокоалюминатным цементам и особенно к цементам белитового состава;
- увеличенные деформации раствора (бетона) наблюдаются при повышенном содержании в его составе тонкодисперсных наполнителей (зол, шлаков, минеральных наполнителей).

Усадка раствора при высыхании может быть существенным недостатком и требует регулирования и контроля для многих видов ССС: шпатлевок, затирок, смесей для устройства полов.

Если отсутствие деформаций расширения, обусловленных неравномерным изменением объема, гарантируется производителем цемента, то расширение, связанное с реакционной способностью заполнителя, может создать проблемы для изготовителей ССС на основе цементов. Это относится прежде всего к случаям щелочной коррозии заполнителя, т.е. к **взаимодействию щелочей**, содержащихся в цементе, с **реакционно-способным кремнеземом**, входящим в состав мелкого заполнителя (песка). Решение этого вопроса состоит в анализе песка на содержание активного (опаловидного) кремнезема и в отказе от его использования, особенно при применении цементов с повышенным содержанием щелочей ($R_2O > 1,2 \%$).

В отдельных случаях, при проектировании составов ССС, необходимо учитывать также деформации при карбонизации и такое свойство цементного камня, как ползучесть.

Активность цемента (гидравлическая активность) оценивается по прочности цементного камня – его способности противостоять механическим нагрузкам (сжатию, изгибу, растяжению). Понятно, что характеристика прочности, кроме свойств самого цемента, зависит от состава образца, его размеров, условий твердения и др. Сравнимые результаты по активности цементов можно получить только при испытании в одинаковых условиях. Результаты определения активности цемента при испытании по ГОС Г 310 позволяют отнести цемент к той или иной марке.

Основные факторы, определяющие активность цемента.

1. Вещественный состав цемента (количество и вид активной добавки в цементе). Активность цемента при введении в его состав добавки, как правило, снижается, но не пропор-

ционально количеству введенной добавки и тем в меньшей степени, чем активнее добавка. Известны цементы, содержащие значительное количество доменного шлака, активность которых сопоставима с активностью исходного клинкера. При введении инертных добавок (кварц, кальцит) активность цемента понижается пропорционально количеству введенной добавки.

2. Тонкость помола цемента является важным фактором, влияющим на его гидравлическую активность. В ряде случаев низкомарочные цементы отличаются от высокомарочных только тонкостью помола при одинаковом составе клинкера и количестве введенной добавки. Однако, как правило, повышение тонкости помола обеспечивает ускорение гидратации и повышение прочности в ранние сроки твердения (2...3 сут), а цементы, квалифицированные как быстротвердеющие (цементы с индексом «Б» по ГОСТ или «R» по EN), во всех случаях являются тонкомолотыми и имеют удельную поверхность 400...500 м²/кг и более. Кроме общей характеристики тонкости помола по удельной поверхности установлено, что быстротвердеющие цементы должны иметь определенный гранулометрический состав, например, содержание зерен размером 5...30 мкм должно быть не менее 30%.

3. Главным фактором, определяющим прочность цемента, принято считать активность клинкера, которая, в свою очередь, зависит от его минералогического состава. Общеизвестно, что для получения быстротвердеющих и особенно высокопрочных (высокомарочных) цементов клинкер должен быть алитово-алюминатным, к примеру, содержать C_3S – 65...70% и C_3A = 6...10%. Использование клинкера такого состава в сочетании с необходимой тонкостью помола обеспечивает высокую марку цемента (> 500). Одна из типовых кривых кинетики твердения (нарастания прочности) трех типов цементов – рядового (400), быстротвердеющего (400) и высокопрочного (500) – приведена на рис. 3.12. Как видно из рисунка, активность БТЦ в возрасте 3 сут превышает активность как рядового цемента, так и высокопрочного, однако последний набирает необходимые значения активности к 28 сут.

Из прочих факторов, влияющих на активность цементов, необходимо выделить введение в состав цемента или в состав твердеющей композиции (раствора, бетона) специальных добавок, скажем ускорителей твердения. Эти добавки могут быть компонентами цемента (добавки сульфоалюминатного типа, которые вводятся при помоле цемента) или вводятся при приготовлении сухой смеси. Реальное количество видов таких добавок, пригодных для ССС, ограничено.

Ряд свойств цементного камня связан с формированием пористой структуры и проницаемости цементного камня. Главное из этих свойств – **морозостойкость цементного камня**. Основным фактором, определяющим морозостойкость, является структура порового пространства. Если все поры в камне будут

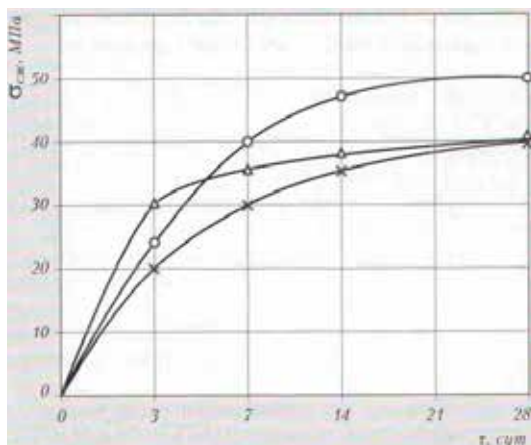


Рис. 3.12. Кинетика нарастания прочности трех типов портландцементов:
X – рядовой 400; БТЦ 400; О-ВПЦ 500

заполнены водой, разрушение может произойти уже после первого цикла замораживания. Морозостойкость обусловлена присутствием в структуре камня определенного объема пор, не заполненных водой, в которые отжимается часть воды при замораживании. При твердении цементного камня возникает система пор, заполненных паровоздушной смесью, так называемые резервные поры, наличие которых и определяет морозостойкость цементного камня. Разрушение материала происходит тогда, когда объем резервных пор, в которые может отжиматься вода, мал по сравнению с объемом образующегося льда, или когда в результате многократно повторяющихся циклов замораживания все поры будут

постепенно заполнены водой. Чем выше относительный объем резервных пор по сравнению с общим объемом пор, заполненных водой, тем выше морозостойкость раствора, бетона и т.п. Основными источниками таких резервных пор являются поры геля С-S-H, а также контракционные поры, образовавшиеся в ходе гидратации и твердения цемента. Если этих пор оказывается недостаточно для достижения заданной морозостойкости бетона, в его состав вводят специальные воздухововлекающие добавки, обеспечивающие дополнительное количество резервных пор.

С характеристикой поровой структуры цементного камня также связана его химическая стойкость. Вода, проникающая в цементный камень, будет растворять (выщелачивать) его компоненты, а растворенные в ней соли будут при испарении воды кристаллизоваться в поровой структуре, создавая внутренние напряжения. Кроме этого, растворенные в воде вещества или газы могут химически взаимодействовать с компонентами цементного камня, разрушая последний. Цементный камень разрушается под действием кислот, щелочей и солей, а интенсивность такого разрушения определяется как составом, так и проницаемостью камня, а также концентрацией реагентов и их составом. Химическая коррозия во многих случаях сопровождается биологической (бактериальной) агрессией, являющейся причиной разрушения цементного камня. Стойкость цементного бетона к химической коррозии, в зависимости от вида цемента, увеличивается в следующей последовательности:

портландцемент → шлакопортландцемент → сульфатостойкий портландцемент и пуццолановый портландцемент

гипсошлаковый цемент → глиноземистый цемент.

Однако во многих случаях проницаемость бетона влияет на его долговечность значительно больше, чем вид применяемого цемента.

3.11. Строительно-технические свойства известковых, гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ

Гидратная воздушная известь (пушонка) применяется в составах ССС самого различного назначения: штукатурных, кладочных, шпатлевок, затирок, самовыравнивающихся наливных полов и др. Известь может использоваться как самостоятельное вяжущее в известково-песчаных смесях, а также входить в состав строительных растворов в смеси с другими вяжущими – цементом, гипсом, ангидритом, глиной.

Важнейшими строительно-техническими свойствами гидратной извести, определяющими техническую целесообразность ее введения в состав строительных растворов, являются высокая пластичность и водоудерживающая способность, а также высокая пескоемкость.

Гидратная известь может придавать строительным растворным смесям тиксотропные свойства.

Технические требования к строительной извести и методы ее испытаний регламентируются, соответственно, ГОСТ 9179 и ГОСТ 22688.

Качество гидратной воздушной извести оценивают по следующим показателям:

- по содержанию активных $\text{CaO} + \text{MgO}$;
- по содержанию в извести остатков неразложившихся при обжиге карбонатных пород, характеризующихся количеством диоксида углерода (CO_2);
- по предельно допустимому значению влажности;
- по степени дисперсности;
- по выдерживанию испытания на равномерность изменения объема.

Воздушная гидратная известь по этим показателям должна соответствовать требованиям, приведенным в табл. 3.19.

Таблица 3.19

Свойства воздушной гидратной строительной извести

Наименование показателя	Норма для гидратной извести, % масс.	
	1-й сорт	2-й сорт
Активные CaO + MgO, не менее:		
без добавок	67	60
с добавками	50	40
CO ₂ , не более:		
без добавок	3	5
с добавками	2	4
Влажность, %, не более	5	5
Проход через сито:		
с сеткой № 02, не менее	98,5	98,5
с сеткой № 008, не менее	85	85
Равномерность изменения объема	Выдерживает	Выдерживает

Свойство равномерности изменения объема при твердении имеет определяющее значение для оценки пригодности извести к ее использованию в составах ССС. Известный исторический опыт применения гидратной извести в строительстве заключался в том, что для приготовления известковых растворных смесей использовалась только хорошо прогидратированная известь в виде известкового теста, причем выдержка гашеной извести в творялах перед ее практическим применением составляла от нескольких месяцев до нескольких лет. Наличие в исходном сырье (в негашеной извести), помимо остатков неразложившегося карбоната кальция и минералов, образовавшихся в результате высокотемпературных реакций (двухкальциевого силиката, алюминатов и ферритов кальция) малоактивных, грудногасящихся частиц оксида кальция (пережога), нередко является причиной того, что гидратная известь не выдерживает испытания на равномерность изменения объема. В процессе твердения строительных растворов, приготовленных с использованием такой извести, происходит их разрушение с образованием характерных трещин и вздутий («дутиков»), которые напоминают по форме конусообразные возвышенности, в связи с чем в стандарте ASTM C-110 это явление обозначается термином, который можно перевести как «точечная коррозия» (Pitting). Причина наблюдаемых разрушений заключается в том, что пережженные частицы оксидов кальция и магния не успевают в процессе гашения перейти в гидроксиды, и их гидратация происходит уже на стадии формирования прочности строительного раствора и протекает с увеличением объема твердой фазы почти вдвое, вызывая появление механических напряжений, превышающих прочность раствора. Часто непогасившиеся частицы оксида кальция входят в состав агломератов, которые имеют размер более 0,5...0,6 мм, поэтому удаление таких грубых фракций может рассматриваться как метод борьбы с неравномерностью изменения объема.

Действующим стандартом на методы испытаний строительной извести (ГОСТ 22688) предусмотрено определение равномерности изменения объема извести при твердении. Испытание извести на равномерность изменения объема сводится к следующим операциям:

- навеска извести массой 30...40 г затворяется водой до консистенции теста, к которому добавляют при перемешивании такое же количество цемента и воду до получения теста нормальной густоты;
- нормальную густоту контролируют по погружению пестика прибора Вика. Тесто закладывается в кольцо определенного размера;
- из двух равных частей теста нормальной густоты на стеклянной пластине, предварительно протертой машинным маслом, формируют образцы-лепешки диаметром 60...70 мм и толщиной 7...8 мм;

- образцы помещают в ванну с гидравлическим затвором, обеспечивающую условия влажного хранения, на (24 ± 2) ч;
- образцы вместе с пластинкой переносят в камеру для пропаривания, где помещают на решетку, расположенную на расстоянии не менее 30 мм над уровнем воды и доводят воду до кипения, которое поддерживают в течение 2 ч;
- через 1 ч производят осмотр образцов. Если обнаруживают признаки неравномерности изменения объема, то испытания прекращают.

Известь считается выдержавшей испытания на равномерность изменения объема, если на поверхности образцов не обнаруживаются радиальные трещины, доходящие до краев, сетки мелких трещин, а также какие-либо искривления, увеличение объема и образование непрочной, рыхлой структуры.

Практический опыт свидетельствует о недостаточной надежности выявления неравномерности изменения объема по методике ГОСТ 22688. Некоторые образцы извести, испытанные по этой методике и выдержавшие испытания на равномерность изменения объема, при последующем пребывании в воздушно-сухой атмосфере (с влажностью 60...70 %) через 1–1,5 месяца обнаруживали тенденцию к растрескиванию. Характер трещин на поверхности образцов не оставлял сомнений в природе их происхождения: неравномерность изменения объема. Причиной низкой эффективности предлагаемой ГОСТ 22688 методики, по нашему мнению, являются следующие обстоятельства:

ГОСТ не предъявляет никаких требований к прочностным показателям – марке и скорости набора прочности цемента, используемого при проведении испытания; отсутствуют какие-либо ограничения вещественного состава цемента.

При низкой скорости набора прочности цементом, которая к тому же падает в присутствии извести, деформации, обусловленные гидратацией непогасившихся зерен оксида кальция, могут происходить в системе, еще сохраняющей определенные пластические свойства, поэтому при локальных изменениях объема возникающие механические напряжения приводят лишь к уплотнению пористой структуры твердеющего теста и не вызывают появления трещин. При наличии в составе цемента активной минеральной добавки степень гидратации оксида кальция может возрастать из-за проявления добавкой пуццоланического эффекта.

В связи с изложенным, было бы целесообразно обратиться к опыту определения неравномерности изменения объема извести в других странах. Стандартом ASTM C-110 «Стандартные методы испытаний физических свойств негашеной, гидратной извести и известняка» (Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime and Limestone) для выявления неравномерности изменения объема гидратной извести используются две методики [67]: «Автоклавное расширение гидратированной извести» (Autoclave Expansion of Hydrated Lime) и «Трещинообразование и точечная коррозия гидратированной извести» (Popping and Pitting of Hydrated Lime). Сущность методики автоклавного расширения заключается в том, что из навески гидратной извести под определенным давлением прессуется таблетка, диаметр которой измеряется микрометром. Таблетка помещается в автоклав, позволяющий создать давление насыщенного водяного пара 1034 кПа. Подъем давления и время выдержки регламентированы стандартом. Суммарное время автоклавной обработки составляет 2 ч. После автоклавной обработки и охлаждения вновь производится измерение диаметра таблетки и рассчитывается процент расширения таблетки после ее обработки в автоклаве. Методика автоклавного расширения используется также для испытания извести в композиции с цементом и заполнителем. Для этого испытания применяют портландцементы типа I или типа II. В качестве заполнителя используется стандартный заполнитель на основе порошкообразного известняка, характеризующийся проходом через сито с ячейкой 212 мкм. Содержание диоксида кремния (SiO_2) в известняке не должно превышать 0,5 %. При проведении этого испытания таблетки для измерения величины автоклавного расширения прессуются из тщательно

перемешанной смеси, которая содержит: 14 г портландцемента, 8 г гидратной извести и 72 г стандартного заполнителя (порошкообразного известняка). Параллельно испытывается еще образец сравнения – «стандартная таблетка», смесь для прессования которой включает 72 г портландцемента и 16 г стандартного заполнителя. После автоклавной обработки определяют расширение таблетки из испытываемой смеси портландцемента с известью и заполнителем и из смеси портландцемента с заполнителем.

Как следует из описания процедуры автоклавного испытания, стандарт ASTM C-110 нормирует тип цемента и предписывает использовать при проведении испытания заполнитель (карбонат кальция), инертный в условиях автоклавной обработки по отношению к извести. Что касается оценки качества извести по результатам измерений автоклавного расширения, то конкретные данные, ограничивающие допустимые значения пределов расширения, отсутствуют, и потребители должны полагаться на результаты испытаний, полученных в собственных лабораториях.

Другим видом испытаний по стандарту ASTM C-110 служит оценка «Трещинообразования и точечной коррозии». Этот метод является индикатором возможного появления дефектов на поверхности штукатурных растворов. При проведении этого испытания используется гипсовое вяжущее, предназначенное для финишных отделочных покрытий, совместно с известью (Gauging plaster). Гипсовое вяжущее должно иметь время схватывания не более 1 ч. Испытание по этой методике состоит в следующем:

- 100 г гидратной извести смешивают с таким количеством воды, которое обеспечивает необходимую пластичность теста, оцениваемую с помощью прибора Вика по величине пенетрации (погружения) пестика (20...5 мм);
- к тесту добавляют 25 г гипсового вяжущего и дополнительное количество воды для сохранения рабочей консистенции. На стеклянной пластинке формируют лепешку диаметром 150...200 мм и толщиной порядка 3 мм. Поверхность заглаживают и лепешки оставляют выстаиваться на ночь;
- пластинку с лепешкой помещают в камеру пропаривания, защищая поверхность лепешки от попадания на нее капель конденсата. Температуру в камере поднимают до кипения и выдерживают при этой температуре 5 ч, после чего образцы вынимают из камеры и осматривают на предмет обнаружения трещин и кратеров («дутиков»).

Известь, проявляющая свойство неравномерности изменения объема, надежно выявляется с помощью такого метода контроля. Похожий метод определения неравномерности изменения объема извести предлагается и в европейском стандарте EN459–2.

Наиболее важными для практического использования в составах строительных растворов смесей свойствами гидратной извести являются ее пластичность и водоудерживающая способность. К сожалению, в действующем ГОСТ 9179 какие-либо требования в отношении как пластичности, так и водоудерживающей способности отсутствуют. Стандартом ASTM C-110 пластические свойства гидратной извести оцениваются двумя способами: путем определения стандартной консистенции известкового теста (по величине водопотребности) и посредством определения пластичности известкового теста (с помощью пластометра Emley). Показатель пластичности определяют по уравнению:

$$P = \sqrt{F^2 + (10T)^2},$$

где P – показатель пластичности; F – отсчет по шкале прибора в конце испытания; T – время от начала до конца испытания, мин.

Высококачественное известковое тесто должно иметь показатель пластичности не менее 200, а водопотребность – не менее 80 %.

Пластичность гидратной извести зависит от состава сырья, степени обжига и способа гашения извести. Гашение мокрым способом дает более пластичное тесто, чем гашение

известки сухим способом – в пушонку, с последующим затворением ее водой. Причина различий в пластичности известкового теста состоит в различной удельной поверхности частиц известки. При гашении по мокрому способу удельная поверхность известки оказывается существенно большей, чем у известки, гашеной по сухому способу. Значения удельной поверхности гидратной известки, полученной при различных условиях гашения, могут изменяться в пределах от 6 до 45 м²/г.

Мягкообожженная известка (обожженная при относительно низких температурах 900...1000°С) дает при гашении продукты, которые по удельной поверхности на 30 % отличаются от полученных гашением высокообожженной известки. Для получения гидратной известки с максимальной удельной поверхностью (а следовательно, и пластичностью) процесс гашения необходимо проводить при оптимальной температуре воды и оптимальном водо-известковом отношении. Эти характеристики для каждого вида негашеной известки должны быть определены экспериментально.

При гашении известки должны выдерживаться определенные условия: для быстрогасящейся (не более 8 мин) известки гашение следует проводить путем добавления известки к воде; для известки со средней и низкой скоростями гашения следует добавлять воду к известке, при этом следует исключить добавление избыточного количества воды и добавлять ее малыми порциями (ASTM C5).

На формирование известкового теста высокой пластичности влияет не только размер частиц, но и, в не меньшей степени, их форма. Наиболее дисперсные частицы высокопластичного известкового теста имеют пластинчатую и удлинненную форму. В кристаллографическом смысле эти частицы характеризуются как одноосные, гексагональные пластинчатые кристаллы. С одной стороны, эти кристаллы обеспечивают возможность скольжения и сдвига, с другой – сцепления и стабилизации суспензии. Их подвижность и способность к слипанию являются факторами, обуславливающими наивысшую пластичность.

Частицы гидратной известки склонны к образованию агломератов и конгломератов, поэтому введение в состав известковых суспензий поверхностно-активных веществ, обладающих диспергирующим действием, способствует повышению пластичности и устойчивости суспензий к осаждению. Наличие в гидратной известке неразложившихся частичек карбоната кальция отрицательно сказывается на пластичности известки. К снижению пластичности приводит также поглощение из воздуха известью диоксида углерода (рекарбонизация). Это обстоятельство было хорошо известно строителям прошлого. При подготовке гашеной известки к использованию для достижения наивысшей пластичности продукт гашения в процессе выдержки подвергался периодическому механическому воздействию («сечению» с помощью металлических полос – секир, «убиению» – с помощью дубовых пест), а образующаяся на поверхности слоя воды над гашеной известью плавающая пленка из карбоната кальция (так называемая емчуга) периодически удалялась.

Пластичность в значительной мере определяет пескоемкость известки и удобообрабатываемость строительных растворных смесей. Чем выше пластичность известкового теста, тем большее количество песка можно добавить к известково-песчаному раствору без водоотделения и седиментации смеси. Обычно в известковые растворы песок может вводиться в соотношении 1 : 3...1 : 4, а в растворы на портландцементе – в соотношении 1 : 2...1 : 3. Высокопластичную известку определяют иногда термином «жирная», а низкопластичную – «тощая». Косвенным показателем степени жирности известки служит содержание в ней активных гидроксидов (оксидов) кальция и магния. Чем оно выше, тем большей является жирность известки. Пластичность известки может быть оценена также по выходу известкового теста. Так, «жирная» известка характеризуется выходом теста 2,2 л/кг, «тощая» – 1,6 л/кг.

Присутствие в негашеной известке оксида магния может понизить пластичность гидратной известки. В то же время высокогидратированные доломитовые известки, полученные из

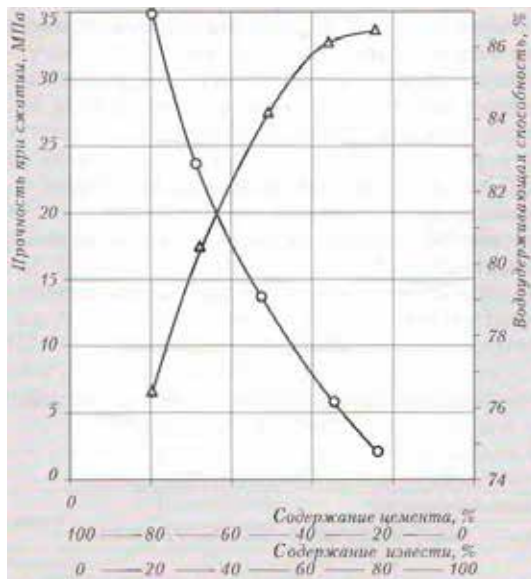


Рис. 3.13. Влияние соотношения извести и цемента в известково-песчаном растворе 1 : 3 на водоудерживающую способность растворной смеси и прочность раствора при сжатии [69]: о-о — прочность раствора при сжатии; -а- — водоудерживающая способность растворной смеси

мягкообожженного сырья, характеризуются хорошей пластичностью и высокой водоудерживающей способностью. К сожалению, водоудерживающую способность, как и пластичность, ГОСТ 9179 не регламентирует, в то время как целесообразность применения извести во многих составах ССС обусловлена именно этими свойствами гидратной извести. Гидратная известь хорошего качества способна удерживать воду в суспензии примерно в соотношении $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Если известь менее жирная, то количество связанной воды меньше и суспензия быстро оседает, а вода отделяется на поверхности в виде прозрачного слоя. В известково-песчаных растворах соотношение известь-вода примерно такое же, как в известковых суспензиях, так как часть воды идет на смачивание зерен заполнителя. Если известковую суспензию подвергнуть вакуумированию на фильтре, то в продукте обезвоживания на каждую молекулу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ остается еще около трех молекул воды, что характеризует высокую водоудерживающую способность извести, имеющую очень важное практическое значение при нанесении

строительных растворных смесей на пористые основания. Сохранение воды в твердеющей растворной смеси особенно важно для цементно-известковых составов, так как твердение цемента протекает только во влажных условиях. Влага, сохраняющаяся в объеме цементно-известкового раствора, способствует также снижению усадочных деформаций. Высокая дисперсность гидратной извести и процессы ее карбонизации обеспечивают повышенное сцепление вяжущего с заполнителем и увеличивают прочность сцепления известьсодержащих растворов с основаниями (особенно с пористыми).

На рис. 3.13. приведены данные об изменении водоудерживающей способности смеси извести с цементом и песком.

Цементно-песчаная растворная смесь характеризуется весьма низкой водоудерживающей способностью — не более 75...77%. Водоудерживающая способность известково-песчаных растворных смесей может достигать до 90%. Водоудерживающая способность строительных растворных смесей определяется по ГОСТ 5802.

Применение в составах ССС гидратной извести позволяет повысить пластичность и водоудерживающую способность растворных смесей, придает им тиксотропные свойства и повышает прочность сцепления растворов с основаниями. Введение функциональных добавок позволяет обеспечить соответствующие строительно-технические свойства растворных смесей и растворов и без использования в их составе строительной извести, однако известь нужно рассматривать как комплексную функциональную минеральную добавку, применение которой дает возможность снизить расход дорогостоящих органических функциональных добавок (эфиров целлюлозы, редиспергируемых полимерных порошков и загустителей тиксотропного действия — сложных эфиров крахмала или минеральных загустителей на основе монтмориллонита) и понизить стоимость ССС.

Гипсовые вяжущие по сравнению с другими минеральными вяжущими характеризуются следующими особенностями:

- короткими сроками начала и конца схватывания;
- равномерностью изменения объема при твердении;

хорошей удобоукладываемостью;
высокой пористостью, пониженной плотностью и, следовательно,
хорошими звуко- и теплоизоляционными свойствами;
высокими огнезащитными характеристиками;
способностью регулировать влажность в помещении за счет гигроскопической влажности;
хорошей обрабатываемостью (легкостью механической обработки, гвоздимостью и т. п.);
низкими технологическими энергозатратами.
Вместе с тем гипсовым вяжущим свойственны недостатки:
большое водопоглощение гипсового камня;
высокая водопотребность (до 70 % масс.);
ползучесть затвердевшего гипсового вяжущего;
низкая водостойкость;
коррозия стальной арматуры в гипсовых изделиях.

Наиболее широко применяемым гипсовым вяжущим веществом является строительный гипс. Основу строительного гипса составляет (3-полу- гидрат сульфата кальция – $\beta\text{CaSO}_4 - 0,5\text{H}_2\text{O}$). Современная технология строительного гипса базируется на производстве многофазных и модифицированных гипсовых вяжущих. В составе многофазного гипса содержится от 30 до 60 % β -полугидрата сульфата кальция и растворимого ангидрита III, а также некоторое количество ангидрита II (труднорастворимого и нерастворимого) с температурой синтеза от 300 до 700 °С и выше. Многофазные гипсовые вяжущие получают путем смешения низко- и высокообжиговых продуктов термообработки сульфатов кальция. Регулирование соотношения между отдельными фазовыми составляющими обеспечивает получение вяжущих с требуемыми свойствами: определенными сроками схватывания и твердения, водопотребностью, живучестью и др. Модифицированные гипсовые вяжущие представляют собой тонкоизмельченные гипсовые вяжущие вещества воздушного твердения, которые в соответствии с определенными областями применения уже на заводе-изготовителе смешиваются с различными функциональными добавками: замедлителями или ускорителями схватывания и твердения, пластифицирующими и водопонижающими, водоудерживающими, воздухововлекающими, пенообразующими и т. п.

В России производство многофазных гипсов не налажено, и основными видами гипсовых вяжущих являются строительный гипс на основе Р-полугидрата сульфата кальция и высокопрочный или технический гипс на основе а-полугидрата сульфата кальция. ГОСТ 125 «Вяжущие гипсовые. Технические условия» распространяется только на гипсовые вяжущие, получаемые термической обработкой сырья до полугидрата сульфата кальция, и не распространяется на другие гипсовые вяжущие

многофазные гипсы, модифицированные гипсовые вяжущие, ангидритовые вяжущие и другие вяжущие материалы на основе сульфата кальция.

Условное обозначение гипсового вяжущего по ГОСТ 125 включает характеристику вида вяжущего – букву «Г» (гипсовые вяжущие); цифру, обозначающую марку вяжущего по прочности, в МПа; индекс сроков схватывания (А, Б, В) и индекс степени помола (I, II, III). Пример условного обозначения: Г-6АШ – означает, что речь идет о гипсовом вяжущем, характеризующемся пределом прочности при сжатии в возрасте 2 ч не менее 6 МПа, сроками начала схватывания не ранее 2 мин и не позднее 15 мин, и максимальным остатком на сите 0,2 мм не более 2 % масс, (см. табл. 3.20 и 3.21).

Таблица 3.20

Классификация гипсовых вяжущих по срокам схватывания

Вид вяжущего*	Индекс сроков схватывания	Сроки схватывания, мин	
		начало, не ранее	конец, не позднее
Быстротвердеющее	А	2	15
Нормальнотвердеющее	Б	6	30
Медленнотвердеющее	В	12	Не нормируется

* В тексте ГОСТ 125–79 вместо терминов «быстротвердеющее» и т.д. ошибочно употреблены термины «быстротвердеющее», «нормальнотвердеющее» и т.д.

Таблица 3.21

Классификация гипсовых вяжущих по степени помола

Вид вяжущего	Индекс степени помола	Максимальный остаток на сите с размерами ячеек в свту 0,2 мм, не более, % масс
Грубый помол	I	23
Среднего помола	II	14
Тонкого помола	III	2

ГОСТ 125 не выделяет среди наименований гипсовых вяжущих такие определения, как «строительный гипс» и «высокопрочный гипс», в то время как эти термины для обозначения соответствующих продуктов в научной и технической литературе являются традиционными. Их употребление, по нашему мнению, вполне оправдано, поскольку гипсовые вяжущие на основе полугидрата сульфата кальция, несмотря на практически одинаковый химический состав, не взаимозаменяемы по строительно-техническим свойствам и области применения. Строительный гипс в быту иногда называют алебастром, что ранее было распространено в строительной практике (это неправильно по существу, так как в минералогии алебастром называют разновидность мелкокристаллического известняка) и ныне является устаревшим синонимом строительного гипса.

Прочность и марка гипсовых вяжущих определяются по результатам испытаний образцов размером 40 x 40 x 160 мм, изготовленных из гипсового теста стандартной консистенции (нормальной густоты) после твердения образцов на воздухе в течение 2 ч (ГОСТ 23789). В процессе испытания определяют предел прочности на растяжение при изгибе (как среднее арифметическое результатов трех измерений) и предел прочности при сжатии (как среднее арифметическое результатов испытаний четырех из шести образцов, полученных при испытании на изгиб, без учета наибольшего и наименьшего результатов). Стандартом предусмотрены 12 марок гипсовых вяжущих, устанавливаемых по пределу прочности при сжатии: Г-2...Г-25. Цифра в обозначении марки соответствует минимальному значению предела прочности при сжатии в МПа. Для каждой марки регламентируется минимальное значение предела прочности при изгибе в пределах, соответственно, от 1,2 до 8,0 МПа.

Строительные гипсы характеризуются относительно невысокими значениями марок по прочности Г-2...Г-7, а высокопрочный гипс – высокими марками Г-10...Г-25. Следует отметить, что для некоторых видов работ – изготовления строительных блоков, вытягивания карнизов, выполнения архитектурных деталей – применяют строительные гипсы (Г-2...Г-7), гипсовые вяжущие высоких марок (Г-10...Г-25), т.е. высокопрочные гипсы, могут быть использованы в строительном деле как отделочные материалы при штукатурных работах, заделке швов, а также для специальных целей (см. ГОСТ 125, приложение 1). Ограничения на применение высокопрочных гипсов в строительном материаловедении обусловлены присущей для высокопрочного гипса способностью деформироваться под действием постоянной нагрузки (ползучесть), что может являться причиной разрушения соответствующих конструкций и изделий.

В строительном деле гипсовые вяжущие используются в составе штукатурных растворов смесей (гипсовых, известково-гипсовых), шпатлевок, в составах для заделки швов (фуговочных), в клеевых составах для крепления облицовочных плиток, в мастиках для приклеивания сухой гипсовой штукатурки, в составах для выполнения монолитных полов (на основе ангидрита и эстрих-гипса). Кроме того, гипсовые вяжущие применяются в производстве гипсовых стеновых блоков и панелей, сухой гипсовой штукатурки, звукоизолирующих гипсокартонных плит (строительный гипс), а также при изготовлении искусственного мрамора, форм для фарфоро-фаянсового и литейного производств, при изготовлении архитектурных изделий (формовочный, технический гипс, ангидритовое вяжущее), в составах для крепления изоляторов, в отделочных составах (мраморный гипс, цемент Кина) и др.

При использовании гипсовых вяжущих в составах ССС на одно из первых мест выходит требование стабильности такой характеристики, как скорость схватывания и связанная с этим свойством живучесть. Для получения требуемых характеристик в гипсовые вяжущие системы вводят как замедлители (в большинстве случаев), так и ускорители схватывания. Добавки, вводимые в состав гипсовых вяжущих, могут иметь многостороннее действие: изменять водопотребность, водоудерживающую способность, прочность сцепления с основанием и т. д., причем оказываемое влияние на свойства вяжущего может быть как положительным, так и отрицательным. В зависимости от концентрации добавки ее действие может радикально изменяться. Эффективность действия добавок зависит также от температуры применения растворов смесей.

Ускорителями схватывания и твердения гипсовых вяжущих являются неорганические кислоты и их соли (в особенности серная кислота), щелочные сульфаты, тонкомолотый гипс ($\text{CaSO}_4 - 2\text{H}_2\text{O}$), сульфат аммония и др.

К замедлителям схватывания и твердения гипсовых вяжущих относятся различные органические кислоты (лимонная, винная) и их щелочные водорастворимые соли, соли фосфорных и борной кислот, простые и сложные карбоновые и сульфоновые кислоты, а также различные органические вещества растительного и животного происхождения – декстрин, казеин, желатин, глютин, водорастворимые аминокислоты и их соли, сахара, некоторые спирты и др. Органические соединения часто проявляют пластифицирующее действие, при этом понижение водопотребности вяжущего ведет к повышению прочности. При увеличении концентрации органических добавок может существенным образом изменяться морфология кристаллов дигидрата сульфата от длиннопризматических до компактных форм, что ведет к падению прочности. Отчетливое влияние на действие замедлителей оказывает значение pH твердеющих гипсовых вяжущих. Так, например, введение от 0,1 до 0,2 % масс, винной кислоты не оказывает замедляющего действия, в то время как одновременное введение добавки гидроксида кальция от 0,2 до 1,0 % приводит к максимальному эффекту замедления. Замедляющий эффект зависит от величины pH сложным образом. Так, для винной кислоты и ее солей (тарtratов) трехкратное увеличение сроков схватывания имеет место при pH от 10 до 11, и эффективность замедления продолжает возрастать при повышении водородного показателя. На рис. 3.14 приведены некоторые данные о действии замедлителей на схватывание гипсовых вяжущих.

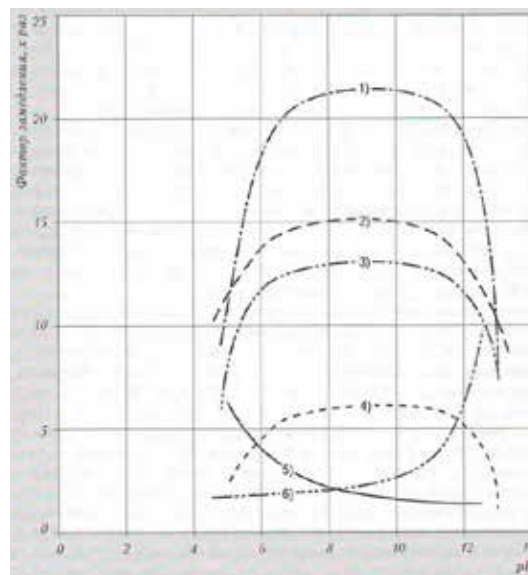


Рис. 3.14. Влияние pH среды на эффективность замедлителей схватывания гипса:

Трикосал в виде порошка (Tricosal Pulver) – 0,2 %; Лимонная кислота – 0,2 %; Натрий лимоннокислый трехзамещенный – 0,2 %; Ретардан П (Retardan P) – 0,02 %; Кальция фосфат однозамещенный – 0,2 %; Винная кислота + известь гидратная – 0,2 %

Ангидритовое вяжущее. Помимо строительного и высокопрочного гипсовых вяжущих, к группе воздушных гипсовых вяжущих веществ относится ангидритовое вяжущее.

Ангидритовое вяжущее получают из гипсового камня путем его обжига при температуре 600...800 °С либо из природного ангидрита (без обжига) с измельчением соответствующего продукта совместно с различными минеральными добавками – активаторами твердения («катализаторами»). В качестве добавок при приготовлении ангидритового вяжущего применяют бисульфат или сульфат натрия в смеси с железным (FeSO_4) или медным купоросом (CuSO_4), известь, доломиты, обожженные при температуре около 900 °С, основные доменные шлаки, золы горючих сланцев и др.

Ангидритовое вяжущее должно размалываться довольно тонко, проход через сито с сеткой № 008 должен быть не менее 85 %. Теоретически количество воды для гидратации ангидрита составляет 26,4 % от массы вяжущего. На практике оптимальное значение водопотребности 18...25 %. Этого количества воды недостаточно для полной гидратации ангидрита, и значительная часть (25...32 %) ангидрита при таком количестве воды остается негидратированной, что может явиться причиной деформаций расширения при последующем увлажнении ангидритового камня.

Ангидритовое вяжущее в отсутствие активаторов твердения характеризуется медленным схватыванием. Начало схватывания наступает не ранее чем через 30 мин, а конец – до 24 ч от начала затворения. При твердении ангидритовых вяжущих могут наблюдаться как незначительная усадка, так и заметное расширение, особенно в случае длительного увлажнения изделий. При применении растворов на ангидритовых вяжущих необходимо точно определять количество воды затворения, так как при ее избытке (как, впрочем, и при недостатке) происходит заметное падение прочности образующегося камня. Активаторы ускоряют твердение ангидрита и переход его в дигидрат сульфата кальция. Подбор активатора твердения играет важную роль в формировании свойств ангидритового вяжущего, так как активаторы твердения влияют не только на скорость схватывания и твердения, но и на деформации образующегося при твердении камня. Содержание активаторов твердения в ангидритовом вяжущем (по DIN4208) не должно превышать:

- для активаторов основного действия – 7 % масс.;
- для солевых активаторов – 3 % масс.;
- для смешанных активаторов – 5 % масс, (из них солевых – 3 % масс.).

В соответствии со стандартом DIN4208 ангидритовые вяжущие могут быть двух марок по прочности – АВ 5 и АВ 20, что соответствует значению предела прочности при сжатии в возрасте 28 сут – 5 и 20 МПа соответственно. Предел прочности при сжатии и изгибе определяется на образцах размером 40 x 40 x 160 мм в количестве трех штук, которые изготавливаются из смеси ангидритового вяжущего с песком в соотношении 1 : 3. Используется стандартный песок по DIN1164 п. 7. Значения прочностных показателей, предъявляемых DIN4208 к ангидритовым вяжущим, представлены в табл. 3.22.

Таблица 3.22

Классификация ангидритовых вяжущих по степени помола

Класс по прочности	Наименьшее значение прочности, МПа, в возрасте			
	3 сут		28 сут	
	при изгибе	при сжатии	при изгибе	при сжатии
АВ 5*	0,5	2	1,2	5
АВ 20	1,6	8	4	20

* АВ означает ангидритовое вяжущее (Anhydrit binder).

Начало схватывания ангидритового вяжущего должно наступать не ранее 25 мин и не позднее 12 ч после начала затворения. Ангидритовое вяжущее должно выдерживать ис-

пытание на равномерность изменения объема при твердении. Расширение или усадка при твердении не должны превышать 0,2 мм/м. Температура, при которой применяются смеси на ангидритовом вяжущем, должна быть в пределах 5...35°C. Выше 35°C ангидрит даже в присутствии активаторов твердеет медленно. Ниже 5°C твердение и высыхание изделий на ангидритовых вяжущих также сильно замедляется. Наилучшим режимом твердения ангидритовых вяжущих является комбинированный: первоначальное твердение во влажных условиях, а затем – на воздухе (высушивание).

Следует обратить внимание на особенности испытания ангидритового вяжущего на равномерность изменения объема. Образцы-лепешки должны в течение 28 сут выдерживаться по смешанному режиму хранения при 20°C, который состоит в том, что вначале образцы помещают в условия влажного хранения на 48 ч, после чего 12 сут хранят на воздухе, затем помещают в воду на 7 сут, затем еще 7 сут выдерживают в воздушной атмосфере. Образцы должны сохранять четкость краев, не обнаруживать искривлений и трещин.

Основная область использования ангидритового вяжущего – изготовление самонивелирующихся полов. Растворные смеси для этого вида полов включают ангидритовое вяжущее, сульфатный активатор твердения и пластификатор на меламинформальдегидной основе. Пол из такого вида раствора доступен для ходьбы через 24 ч. Остаточная влажность менее 1 % достигается через 10... 14 сут. Монолитный пол из самонивелирующихся ангидритовых смесей обладает высокой стабильностью объема, хорошими тепло- и звукоизолирующими свойствами и относительно невысокой плотностью. В состав самонивелирующихся смесей на ангидритовом вяжущем может вводиться заполнитель (природный кварцевый песок или песок, полученный дроблением) в соотношении до 1 : 2 с размером зерен до 2...4 мм. Необходимо обращать внимание на наличие в песке глинистых и пылевидных частиц, а также гумусовых веществ, присутствие которых понижает прочность и ведет к трещинообразованию. В качестве заполнителей не должны применяться такие материалы, как доменные шлаки и трассы.

Покртия на основе ангидритового вяжущего должны защищаться от быстрого высыхания, но после отвердевания не должны подвергаться длительному увлажнению. На ангидритовые растворы (монолитные полы, штукатурку) нельзя наносить растворы на цементных вяжущих.

Высокообжиговый гипс получают обжигом при 800°C сырья, состоящего из двухводного гипса или ангидрита, с последующим измельчением продукта обжига в тонкий порошок. Высокообжиговый гипс называют еще эстрих-гипсом (от немецкого Estrich, что означает стяжка), так как его применение ограничивается, как правило, изготовлением бесшовных полов. Прочность высокообжигового гипса при сжатии составляет 10...20 МПа в возрасте 28 сут. Предел прочности при сжатии в возрасте 7 сут должен быть не менее 6... 14 МПа. Сроки схватывания: начало – не ранее 120 мин от момента затворения, конец не регламентирован. Тонкость помола характеризуется остатками на ситах: с ячейками 0,6 мм не более 2 % масс; с ячейками 0,2 мм не более 10 % масс. В России такое вяжущее, по нашим данным, в настоящее время не производится.

В стандартах некоторых стран имеется гипсовое вяжущее, которое известно под названиями «квасцовый» или «мраморный» гипс (Alaungips (AG) – Германия), а также аналогичное по свойствам вяжущее под названием «гипсовый цемент Кина» (Gypsum Keene's Cement – США). Этот вид вяжущего получают путем двухступенчатого обжига двухводного гипса или ангидрита с введением в продукт первичного обжига активатора твердения – алюмокалиевых квасцов $[KAl(SO_4)_2]$. Мраморный (квасцовый гипс) применяют для имитации мрамора, так как затвердевший камень на основе этого связующего имеет гладкую и красивую поверхность и характеризуется высокой прочностью (-20 МПа). Кроме того, он используется для заделки швов между плитками при облицовочных работах, а также для сборки изоляторов. Гипсовый

цемент Кина (ASTM C-61) предназначен для использования в штукатурных отделочных покрытиях. Сроки схватывания: начало – не ранее 20 мин, конец – не позднее 6 ч. Предел прочности при сжатии – не менее 17 МПа. Тонкость помола: проход через сито с ячейками 425 мкм – не менее 98 % масс, через сито с ячейками 150 мкм – не менее 80 % масс.

Магнезиальные вяжущие – каустический магнезит и каустический доломит – являются вяжущими воздушного твердения и могут использоваться в условиях, когда относительная влажность воздуха не превышает 60...70%. Магнезиальные вяжущие имеют короткие сроки начала схватывания. Каустический магнезит марки ПМК-75 (ГОСТ 1216) при затворении раствором хлорида магния ($\text{MgCl}_2 - 6\text{H}_2\text{O}$ – бишофита) с плотностью 1,2...1,25 г/см³ начинает схватываться уже через 30 мин. Для затворения магнезиального вяжущего могут использоваться растворы сульфата магния ($\text{MgSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$) с плотностью 1,14 г/см³ или растворы карналлита ($\text{KCl} - \text{MgCl}_2 - 6\text{H}_2\text{O}$) с плотностью 1,16...1,22 г/см³. Для приготовления 1 литра раствора хлорида магния с плотностью 1,16...1,22 г/см³ необходимо 0,433 кг шестиводного хлорида магния, а с плотностью 1,22 г/см³ – 0,614 кг.

По физико-химическим показателям и гранулометрическому составу порошок магнезитовый каустический марки ПМК-75 должен отвечать следующим требованиям:

содержание	MgO, %, не менее	75
	CaO, %, не более	4,5
	SiO ₂ , %, не более	3,5
потеря массы при прокаливании,	%, не более	18
влажность, %, не более		1,5
плотность, г/см ³		3,1...3,4
гранулометрический состав:		
проход через сито №2, %		100

Сроки схватывания и предел прочности при растяжении для магнезиального вяжущего на основе порошка марки ПМК-75 должны соответствовать показателям, приведенным в табл. 3.23.

Таблица 3.23

Характеристика вяжущих свойств ПМК-75

Наименование показателя	Норматив
Сроки схватывания, ч-мин:	
начало, не ранее	0–20
конец, не позднее	6–00
Предел прочности при растяжении через 24 ч твердения, МПа, не менее	1,5

Предел прочности при растяжении магнезиального вяжущего определяется испытанием образцов-восьмерок. Образцы готовят из теста нормальной густоты путем смешения в мешалке или вручную порошка каустического магнезита и раствора хлорида магния с плотностью 1,20 г/см³. Нормальной густотой теста из магнезиального вяжущего считается консистенция, при которой пестик прибора Вика погружается в тесто на 4...10 мм (ГОСТ 310.3).

Прочность магнезиальных растворов нарастает быстро. Уже через 24 ч после затворения предел прочности при сжатии составляет не менее 20 МПа. В возрасте 28 сут каустический магнезит имеет прочность при сжатии 40...60 МПа (в образцах из жесткого трамбованного раствора 1:3). По сравнению с ним каустический доломит является менее прочным магнезиальным вяжущим и характеризуется пределом прочности при сжатии в возрасте 28 сут в пределах 10...30 МПа. При этом содержание MgO в каустическом доломите должно быть не менее 15 %, а количество свободного оксида кальция – не более 2,5 %. Средняя плотность каустического доломита – 2,78...2,85 г/см³.

Для обеспечения оптимальных условий формирования прочного камня соотношение исходных компонентов должно выдерживаться достаточно точно. Избыток хлорида магния

делает смесь гигроскопичной, а при его недостатке прочность снижается. На практике используют смеси с соотношением $\text{MgCl}_2 : \text{MgO}$ в пределах от 1 : 2,8 до 1 : 4,1 по массе в пересчете на сухое вещество.

Наиболее часто магнезиальные вяжущие используются для получения разновидности легкого бетона, называемого ксилолитом. В состав ксилолита входит магнезиальное вяжущее (каустический магнезит или каустический доломит), затворитель (растворы хлорида магния или сульфата магния) и органический заполнитель – древесные опилки. Для улучшения сопротивления ксилолита ударным нагрузкам и истиранию в его состав вводят различные минеральные добавки: измельченный кварцевый песок или каменную муку. Введение трепела снижает теплопроводность ксилолита, а тальк повышает его водостойкость. Для придания ксилолиту окраски используют пигменты (железный сурик, охра и др.) в количестве до 5 % по массе.

Растворы магнезиальных солей придают ксилолиту огнестойкость, а слабовыраженные основные свойства продукта твердения магнезиальных вяжущих – гидроксида магния и нейтральный характер образующихся при твердении оксихлоридов магния обеспечивают стабильность в ксилолите органических заполнителей. Оптимальными видами древесины (опилок) для производства ксилолита являются еловые, осиновые, тополевые и пихтовые породы. В качестве древесного заполнителя в ксилолите используют, как правило, отходы лесопиления. Опилки не должны содержать примесей в виде коры и щепы, и для их отделения просеиваются на виброгрохотах через сито с ячейками 5 мм.

В качестве базовой рецептуры для приготовления ксилолита может быть использована смесь раствора хлорида магния с плотностью 1,16 г/см³ (содержание $\text{MgCl}_2 - 6\text{H}_2\text{O} - 37,3\%$), порошка каустического магнезита с насыпной плотностью 750...850 кг/м³ и древесной муки (опилки) с размером частиц от 0,25 до 0,5 мм, при соотношении $\text{MgCl}_2 : \text{MgO} = 1 : 3,5$ (в пересчете на сухое вещество) и древесной муки к MgO 1 : 3,1 по массе.

Магнезиальные вяжущие применяют в строительстве преимущественно в качестве материала для бесшовных полов, а также стяжек под полы из ковровых материалов и линолеума. Растворы на магнезиальном вяжущем, уступая портландцементным составам по водостойкости, превосходят их по ряду других показателей: они характеризуются быстрым набором прочности, безусадочностью, высокой прочностью при сжатии и растяжении, отсутствием пыления, низкой истираемостью. Кроме того, магнезиальные вяжущие обеспечивают высокую огнестойкость и низкую теплопроводность материалов на их основе, устойчивость против биокоррозии и гниения, обладают бактерицидными свойствами, что позволяет применять их для устройства полов в пищевой и фармацевтической промышленности. Высокая электропроводность покрытий на магнезиальных вяжущих устраняет возможность накопления на их поверхности электростатических зарядов и обуславливает их искробезопасность, поэтому магнезиальные полы применяют на взрывоопасных производствах. Магнезиальные бетоны используются и как защитные материалы от нейтронного излучения. Магнезиальные вяжущие применяют также при имитации мрамора, в производстве абразивов, а также в штукатурных и кладочных растворах.

Магнезиальные вяжущие можно применять в сочетании с различными видами заполнителей – как с неорганическими, так и с органическими. Материалы на магнезиальных вяжущих характеризуются низкой плотностью, эластичностью, стойкостью к действию масел, смазок и т.п., что делает их применение особенно эффективным на автообслуживающих предприятиях (гаражи, ремонтные цеха, мастерские, автосклады и т.п.).

В России готовые магнезиальные смеси для различных типов полов, плит, лестничных ступеней, подоконников и др. изделий производятся, например, под маркой Maglit. Основные характеристики полов Maglit:

прочность при сжатии, МПа:	через 1 сут твердения	20...25
	через 28 сут твердения	40...50

прочность на растяжение при изгибе, МПа:	через 1 сут твердения	10...12
	через 28 сут твердения	15...18
истираемость, г/см ² :		0,23...0,29
твёрдость по Бринеллю:		80...100
минимальная толщина (под интенсивные автонагрузки), мм:		25

На отечественном рынке имеются также порошковые смеси на магниевом связующем для изготовления полов, предлагаемые фирмой «Dico isolierstoffindustrie» (Германия). Марки магнезитовых покрытий имеют следующие характеристики: Dico-50, прочность при изгибе 15...16 МПа, прочность при сжатии 60...65 МПа; Dico-100, соответственно, 16...18 МПа и 70...75 МПа; Dico-20–15...16 МПа и 50...52 МПа. Плотность готовых растворов смесей составляет для марки 50–2,10...2,40; марки 100–1,90...2,00 и для марки 20–1,45...1,55 г/см³. Максимальная толщина однослойного покрытия – 15...18 мм. Следует отметить, что полы на магниевом вяжущем из-за их неводостойкости можно эксплуатировать только в закрытых и сухих помещениях. Искусственный камень на магниевых вяжущих не стоек также к действию кислот и некоторых солей, и коррозионно активен по отношению к легким сплавам (алюминиевомагниевого) и сталям.

Высокая адгезионная способность обеспечивает хорошее сцепление магниевых растворов с основаниями, а микропористая структура поверхности обеспечивает хорошее сцепление с различными наклеиваемыми покрытиями (линолеумом, ковровым и др.). Магнелиевые растворы могут наноситься в один или несколько слоев. При однослойном покрытии их толщина составляет от 15 до 25 мм, при многослойной укладке каждый последующий слой должен наноситься на слой, имеющий такую прочность при сжатии, чтобы по нему можно было ходить (> 1,5 МПа). Укладка свежего раствора на незатвердевший слой может привести к его отслоению. Толщина каждого дополнительного слоя должна быть не менее 8 мм. Для покрытий из ксилита в качестве оснований пригодны бетон, железобетон, строительный раствор, дерево. Не пригодны для магниевых растворов основания из шлакобетона, известковых растворов, гипса, асфальта, а также керамических плит.

Искусственный камень на основе магниевых вяжущих имеет собственную светло-серую или светло-желтую окраску и легко окрашивается пигментами по всей массе в различные цвета.

3.12. Влияние функциональных добавок на свойства ССС

Регулирование свойств ССС с помощью функциональных добавок предусматривает воздействие на свойства растворов смесей и на свойства затвердевшего раствора (искусственного камня). Так, применительно к растворным смесям, с помощью функциональных добавок регулируют: водопотребность (В/Ц, В/Т); водоудерживающую способность; сроки схватывания (ускорение, замедление); пластичность; реологические свойства (тиксотропность, склонность к седиментации); воздухововлечение; возможность твердеть при низких и отрицательных температурах и др. Применительно к растворам, с помощью функциональных добавок регулируют: скорость твердения (сроки набора прочности); прочность при сжатии и изгибе; прочность клеевого шва (прочность сцепления); общую и капиллярную пористость; деформации усадки и расширения; плотность; гидрофобность; долговечность (атмосферостойкость, водостойкость, морозостойкость, химическую и биохимическую стойкость).

Рассмотрим более подробно особенности действия функциональных добавок на перечисленные свойства растворов смесей и растворов применительно к группам добавок.

Способность водоредуцирующих добавок (в том числе наиболее часто используемых в составе сухих смесей суперпластификаторов – СП) снижать водопотребность растворной смеси основана на следующем механизме их действия. Добавка суперпластификатора адсорбируется на гидратирующихся цементных зернах и уменьшает их агрегацию (слипание) по следующим причинам:

из-за увеличения сил отталкивания между твердыми частицами происходит рост абсолютной величины дзета-потенциала (однополярность поверхностного заряда частиц);

из-за увеличения сродства твердой и жидкой фаз (если частицы более энергично притягиваются жидкой фазой, чем друг другом, они будут диспергироваться);

из-за создания стерических (пространственных) препятствий вследствие сорбции неионных полимеров частицами, что может ослаблять притяжение между ними (большинство суперпластификаторов являются полимерами).

Введение суперпластификаторов на ранних стадиях взаимодействия цемента с водой дезагрегирует цементные конгломераты, и содержание частиц мелких фракций в присутствии суперпластификатора увеличивается, а последующая коагуляция мелких по размеру частиц до крупных блоков затрудняется, при этом вода, ранее иммобилизованная в агрегатах, высвобождается и обеспечивает дополнительную подвижность цементных частиц (рис. 3.15.).

На кинетику процессов гидратации и структурообразования в цементных системах существенно влияет степень поликонденсации компонентов суперпластификатора. Вследствие сорбции его компонентов на зернах цемента и продуктах гидратации происходит замедление гидратационных процессов, и это явление характерно для полимерных составляющих суперпластификатора, тогда как олигомерные составляющие не влияют на кинетику процесса. Пластифицирующее действие суперпластификатора нафталинформальдегидного типа зависит от степени его поликонденсации: основной вклад в повышение подвижности смеси вносят полимерные фракции. Подробная информация о влиянии суперпластификатора на твердение цементных систем приведена в.

Исходя из реализации механизма действия суперпластификаторов, возможны два пути их практического применения: получение высокоподвижных (литьевых) растворных и бетонных смесей (повышение пластичности смеси без значительного снижения величины В/Ц) и производство высокопрочных растворов (бетонов) из смесей с нормальной текучестью, но при значительно более низкой величине В/Ц. Практически в качестве промежуточного варианта, часто проектируют смеси с требуемой текучестью и заданной прочностью при пониженном расходе цемента.

Литьевые растворные смеси, высокая подвижность которых обеспечивается за счет применения суперпластификаторов, являются, например, основой смесей для устройства полов, и прежде всего самонивелирующихся тонкослойных, а также некоторых инъекционных составов. Суперпластификаторы являются обязательными компонентами большинства ремонтных составов, смесей для получения высокопрочных бетонов и особенно сухих смесей гидроизоляционного назначения с высокой водонепроницаемостью. Во многих случаях суперпластификаторы применяют в составе комплексных добавок полифункционального действия. Необходимо учитывать побочные эффекты влияния суперпластификаторов. Они обычно замедляют сроки схватывания растворной смеси, а достигнутая с их помощью пластичность достаточно быстро (30...60 мин) после повторного перемешивания растворной смеси снижается даже

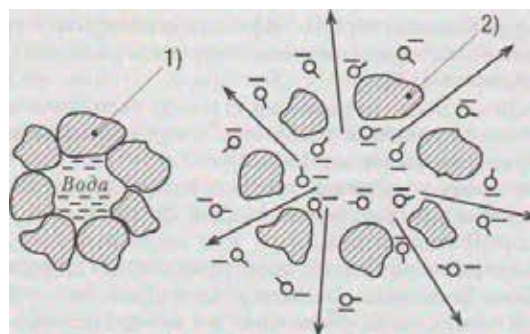


Рис. 3.15. Схема диспергации цементных частиц в присутствии суперпластификатора: 1) – цементное тесто; 2) – пластифицированное цементное тесто

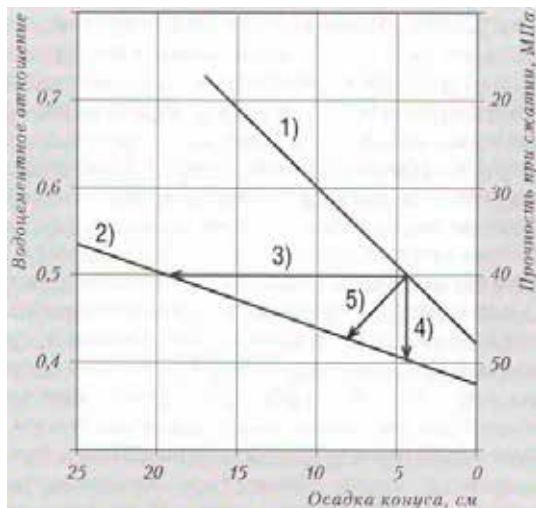


Рис. 3.16. Схема влияния суперпластификаторов на свойства бетонной смеси и бетона [34]: 1) – бездобавочный бетон; 2) – бетон с добавкой МП; 3) – разжижающий эффект; 4) – водоредуцирующий эффект; 5) – комбинированный эффект

ческой природы обеспечивают подобный эффект (редиспергируемые полимерные порошки, эфиры крахмала, модифицированный бентонит и др.). Свойство вододержания особенно важно для ССС, поскольку основная область их применения – это тонкослойные технологии, при которых скорость потери воды максимальна. Для массивных материалов эта проблема менее актуальна, поскольку потеря воды поверхностными слоями компенсируется ее диффузией из толщи образца. При нанесении тонкого слоя растворной смеси на минеральное основание, как правило пористое, вода, вследствие проявления сил капиллярного смачивания, отсасывается пористой структурой из нанесенной растворной смеси. Интенсивность этого процесса зависит от характеристики пористости основания (объема и размера пор) и не зависит от геометрии поверхности. Для уменьшения этого явления основание предварительно смачивают водой, однако в ряде случаев это или ухудшает свойства покрытия, или вызывает определенные трудности при производстве работ. Другой путь снижения водопоглощения основания – снижение его пористости за счет применения промежуточных слоев пропиток или тонкослойных покрытий, так называемых праймеров. Очевидно, что этот вариант достаточно дорог: кроме стоимости праймера должна быть предусмотрена технология его нанесения, но тем не менее такой способ достаточно распространен. Нужно иметь в виду, что отсос воды основанием

– это только один фактор, определяющий потерю воды растворной смесью; вторая составляющая проблемы – испарение воды поверхностью нанесенного слоя. Если эта поверхность не закрыта (например, керамической плиткой), поверхностное испарение достаточно интенсивно, особенно при повышенной температуре воздуха, его низкой относительной влажности и особенно – при движении воздуха. Из-за опасности быстрого высыхания работы по тонкослойной технологии не рекомендуется проводить на сквозняке, ветру или под воздействием прямых солнечных лучей. В отдельных случаях рекомендуется дополнительное смачивание поверхности нанесенного слоя (распылением воды) или пленочная защита (например, с помощью латекса).

Чем же опасна быстрая потеря воды тонкослойным покрытием? Прежде всего быстрое высыхание поверхностного слоя может привести к появлению усадочных деформаций и характерных усадочных трещин, которые потребуют ремонта. При быстром высыхании тонкого слоя может образоваться крупнопористая структура, не залечивающаяся при по-

быстрее, чем в смесях, не содержащих суперпластификаторов. Замедление схватывания в большей степени наблюдается в смесях, содержащих суперпластификаторы нафталинформальдегидного типа по сравнению с суперпластификаторами на меламиновой основе. Наблюдаемые побочные эффекты зависят от многих факторов – исходной пластичности, концентрации суперпластификатора, его вида, содержания цемента и др. Использование суперпластификаторов при обычно принятых концентрациях не вызывает заметного воздухововлечения. Обобщенная схема влияния суперпластификатора на свойства бетонной смеси и бетона приведена на рис. 3.16.

Регулирование **водоудерживающих свойств** растворных смесей на основе сухих строительных смесей осуществляется в основном за счет использования растворимых модифицированных эфиров целлюлозы, хотя и некоторые добавки другой хими-

следующих процессах твердения вяжущего. Кроме того, поскольку твердение вяжущих веществ основано на химическом связывании воды, ее может не хватить для обеспечения необходимой степени гидратации компонентов системы, и требуемые технические характеристики не будут достигнуты. Быстрое поглощение воды основанием в процессе нанесения растворной смеси приведет к резкому снижению ее пластичности, затруднит разравнивание по поверхности и т. д.

Почти идеальное решение проблемы удержания воды в растворной смеси в течение определенного времени состоит в использовании в составах ССС модифицированных эфиров целлюлозы. Если в тонком слое обычная цементно-песчаная смесь может обеспечить вододержание на уровне 75...80%, то водоудерживающая добавка повышает его до 97...98% и более, причем имеется в виду как испаряемая вода, так и поглощаемая подложкой. Для достижения этого эффекта обычно необходима дозировка эфира целлюлозы в 0,1...0,4% от массы сухой смеси, при этом вододержание обеспечивает время, необходимое для завершения ранних стадий процессов гидратации вяжущего вещества, т. е. 0,5...2 ч. При растворении в жидкой фазе твердеющей системы полимерных молекул эфиров целлюлозы вязкость водной фазы значительно возрастает. Время растворения (диспергирования) эфира целлюлозы зависит от двух основных факторов: размера частиц и степени полимеризации, при этом низковязкие материалы растворяются быстрее, чем высоковязкие. Так, по данным Akzo Nobel, увеличение размера частиц порошка от 100 до 600 мкм увеличивает и время растворения (достижения 95% конечной вязкости) с ~8 до ~45 мин. Молекулы растворенной целлюлозы образуют аквакомплексы, прочно удерживающие воду. Энергия удержания воды молекулами эфиров целлюлозы находится в пределах 1250...2500 кДж/кг.

Современные добавки на основе модифицированных эфиров целлюлозы (МГЭЦ, МГПЦ, ЭГЭЦ) характеризуются высокой щелочестойкостью и устойчивостью к действию растворов электролитов, что особенно важно при их использовании в растворных смесях на основе портландцемента, характеризующихся величиной $\text{pH} > 12$. Эфиры целлюлозы как неионогенные ПАВ рассматриваются также в качестве защитных коллоидов, обладающих высокой стабилизирующей способностью. Наряду с водоудерживающим эффектом (основной целью применения добавок такого типа), полезное действие эфиров целлюлозы обусловлено уменьшением седиментации растворных смесей из-за загущения жидкой фазы. Другое свойство, которое обеспечивают эфиры целлюлозы, – это пластификация – улучшение обрабатываемости, удобоукладываемости. Это свойство проявляется во время перемешивания смеси, затирки (разравнивания), укладки. В наибольшей степени эффект пластификации проявляется в системах с низкими значениями В/Ц по сравнению с растворными смесями со средними и высокими В/Ц. Пластифицирующее действие эфиров целлюлозы связано также с воздухововлечением, обусловленным их поверхностно-активными свойствами. При больших дозировках этой добавки и интенсивном перемешивании растворной смеси воздухововлечение может оказаться значительным. Применение модифицированных эфиров целлюлозы в растворных смесях, как правило, вызывает увеличение водоцементного отношения, при этом повышение значения В/Ц зависит также и от соотношения цемент-заполнитель. Защитные коллоидные свойства эфиров целлюлозы приводят к замедлению диффузионных процессов и к неизбежному удлинению сроков схватывания (замедлению схватывания) твердеющих цементных систем, что необходимо учитывать при проектировании их составов.

Рассматривая влияние эфиров целлюлозы на свойства затвердевшего раствора, необходимо отметить, что в большинстве случаев фиксируется некоторое повышение прочности сцепления раствора с основанием – подложкой из цементного раствора (бетона), керамической плиткой. Это имеет значение при использовании таких систем в качестве клеев для керамической плитки, шпатлевок. Отмеченный эффект, видимо, обусловлен собственными вяжущими свойствами целлюлозы, образующей в твердеющей системе тонкие клеящие про-

слойки, а также лучшим проникновением смеси вследствие ее пластификации в поры основания. Можно предположить, что высокие собственные клеящие свойства эфиров целлюлозы являются причиной наблюдаемой повышенной липкости растворных смесей к инструменту при высоких значениях П/Ц (при передозировке добавки).

Однако высокие адгезионные свойства и повышение прочности сцепления с основанием обычно сопровождаются некоторым снижением прочности раствора при сжатии, изгибе и растяжении. Абсолютная величина снижения прочности зависит от вида и концентрации добавки и особенно – от условий твердения (влажное, водное, сухое). Для растворов, модифицированных эфирами целлюлозы, зафиксировано снижение деформаций усадки при высыхании по сравнению с системой без добавки. Следствием присутствия в твердеющей системе эфиров целлюлозы является повышение водопоглощения, связанного со вторичным ее набуханием в воде; однако водопроницаемость при этом снижается, поскольку происходит закупорка и перекрывание капиллярных пор структуры камня целлюлозным гелем, и система становится тонкопористой.

Применение эфиров целлюлозы в качестве загустителей имеет температурные рамки из-за снижения вязкости при повышении температуры, вследствие чего гидратированная целлюлоза теряет сольватирующий слой, дегидратируется и флокулирует. Предельная рабочая температура, при которой происходит флокуляция эфиров целлюлозы и значительное падение вязкости, – 60...70°C. Флокуляция зависит также от наличия и концентрации электролитов в системе. Так, например, по информации фирмы Akzo Nobel, температура флокуляции растворов снижается с 65°C до 30°C при ~ 5 г Na₂SO₄ на 100 мл, при ~ 13 г NaCl и при ~ 24 г NaNO₃.

Если применение суперпластификаторов в составе ССС связано с их последующей сорбцией на поверхности гидратирующихся цементных частиц без образования собственной фазы, а твердеющая система представлена исключительно неорганической составляющей – цементным гелем, то в случае эфиров целлюлозы они, участвуя в формировании цементной матрицы, образуют также и собственную дискретную фазу, тесно перемешанную с цементным гелем. Это делает возможным рассмотрение свойств растворных смесей как полимерцементных композиций, характеризующихся низкими значениями полимерцементного отношения. При обычном содержании эфиров целлюлозы в сухой смеси полимерцементное отношение составляет 0,01...0,03.

Оценивая эффективность применения модифицированных эфиров целлюлозы в ССС по основному назначению – в качестве добавки, существенно увеличивающей водоудерживающую способность растворной смеси, следует ориентироваться на комплексный характер ее действия:

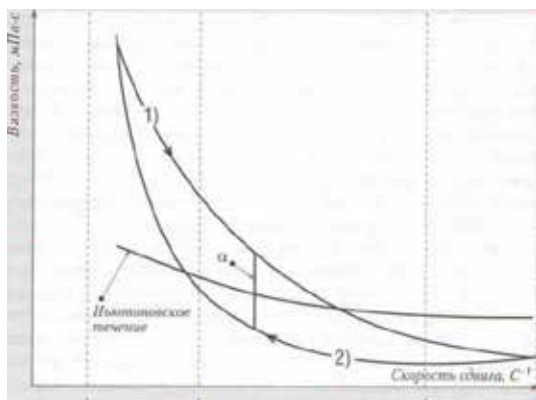


Рис. 3.17. Характеристика вязкости тиксотропных систем:

1) – уменьшение вязкости при повышении скорости сдвига; 2) – восстановление вязкости (повышение) при снижении скорости сдвига; а – тиксотропность системы

эта добавка обладает также свойствами загущения смеси и действует как антиседиментационная, пластифицирует смесь, удлиняет сроки схватывания, повышает водопотребность смеси и т.д. Эти свойства – только часть свойств растворных смесей, регулируемых с помощью **реологических** добавок разного состава и назначения. Так, загустителями комплексного действия являются эфиры крахмала, а также минеральные загустители на основе модифицированных бентонитов.

Кроме общего «загущающего» эффекта, обусловленного повышением вязкости жидкой фазы твердеющей системы, многие реологические добавки обеспечивают тиксотропность системы

(рис. 3.17.). Для тиксотропных систем характерно снижение вязкости при механическом воздействии (увеличении скорости сдвига). Как только скорость сдвига снижается, вязкость самопроизвольно – за счет структурных изменений в системе – мгновенно восстанавливается (возрастает).

На практике тиксотропные системы легкоподвижны в момент их нанесения (ручного или механизированного), а сразу же после прекращения механического воздействия вязкость их возрастает (восстанавливается). Такое поведение системы особенно важно при работах на вертикальных поверхностях, поскольку предотвращает образование характерных натеков. Реологические добавки, обеспечивая высокую вязкость растворной смеси, снижают также водоотделение, обусловленное осаждением относительно крупных частиц заполнителей и наполнителей. Введение эфиров крахмала (например, Amilotex и др.) в составы ССС является приемом уменьшения липкости смесей, содержащих повышенные дозировки эфиров целлюлозы.

К полимерцементным вяжущим системам относятся также ССС, содержащие *редиспергируемые полимерные порошки* и характеризующиеся соотношением П/Ц = 0,1...0,3 и выше. Однако общим свойством полимерцементных систем является формирование непрерывной цементной матрицы – каркаса, состоящего из продуктов гидратации цемента (цементного геля), при этом полимерная (органическая) часть системы распределяется в *цементной* матрице в виде дискретных образований (доменов полимерной смолы). При увеличении П/Ц объем таких дискретных образований увеличивается, они сливаются в пространственные структуры и при некотором значении П/Ц образуют уже собственную органическую *полимерную* матрицу, в которой портландцемент и продукты его гидратации распределяются дискретно и, по существу, при формировании матрицы выступают в качестве минерального наполнителя. К таким системам относятся, например, гибкие гидроизолирующие составы, содержание органического полимера в которых может достигать 30...40%. Однако, как правило, эти материалы являются двухупаковочными, и часть полимера в этом случае вводится в виде водной дисперсии.

Упрочнение полимерцементных систем обусловлено протеканием двух независимых, хотя и связанных друг с другом процессов твердения цементной системы и твердения полимера. Первоначальным требованием к составу полимерцементных композиций должна быть определенная химическая индифферентность компонентов, т.е. цемент и продукты его гидратации не должны химически взаимодействовать с полимерной дисперсией. Для соблюдения этого условия компоненты должны быть подобраны так, чтобы полимерная дисперсия была устойчивой (не коагулировала) под действием растворов щелочей и электролитов, образующихся при гидратации цемента. С другой стороны, химические соединения, составляющие основу полимера, не должны образовывать нерастворимых кальциевых солей с гидроксидом кальция (продуктом гидратации цемента), как это может происходить, например, при использовании поливинилацетатной дисперсии (омыление гомополимера поливинилацетатной (ПВА) дисперсии). Конечно, оба компонента системы химически неоднородны (цемент полиминерален, полимерная дисперсия, кроме основного полимерного продукта, содержит ПАВ-стабилизаторы, поливиниловый спирт (антикоагулянт, антислеживатель) и определенное взаимовлияние их друг на друга имеет место. Тем не менее твердение этих систем должно проходить достаточно независимо. Гидратация и химическое связывание воды цементом начинается мгновенно после смешения сухой смеси с водой. Весьма быстро при образовании полимерной дисперсии с определенным размером частиц происходит диспергирование в воде затворения полимерного порошка (РПП), входящего в состав сухой смеси. По данным производителей РПП, этот процесс занимает 30...60 с, а размер образовавшихся полимерных частиц составляет 0,01...0,5 мкм.

Коалесценция и последующее отвердевание полимерной дисперсии с образованием полимерной пленки начинается тогда, когда система обезвоживается как за счет химического поглощения воды цементом, так и за счет высыхания. Полимерные пленки (мембраны) оказываются вовлеченными в цементный гель, в результате чего формируется сложный органоминеральный конгломерат. Возникновение полимерных мембран тем не менее изменяет кинетику гидратации клинкерных минералов в сторону замедления. Наибольшее влияние полимерная составляющая оказывает на гидратацию C_3S и особенно C_3A , т.е. на фазы с наибольшей скоростью гидратирующиеся в начальные сроки твердения. В полимерцементных композициях прочных химических связей между неорганической и органической составляющей не наблюдается, а взаимодействие имеет коагуляционный характер, основанный на слабых водородных и ван-дер-ваальсовых связях. Затвердевшая полимерцементная структура представлена, таким образом, конгломератом взаимно проникающих минеральных и органических составляющих, причем последние заполняют преимущественно поровое пространство, уплотняя структуру.

Технические характеристики полученного органоминерального конгломерата не являются аддитивными свойствами, определяемыми содержанием в смеси минеральной и органической части, однако вклад каждого компонента в общий уровень свойств является прогнозируемым. Так, введение в состав растворной смеси редиспергируемого порошка повышает ее подвижность (удобоукладываемость). Это действие складывается из трех составляющих: эффекта шарикоподшипников, в качестве которых выступают мелкие резиноподобные частицы полимерной дисперсии вплоть до момента их слияния в мембраны; эффекта воздухововлечения – устойчивых воздушных пузырьков, оказывающих пластифицирующее действие; эффекта диспергирующего действия на цементные агломераты поверхностно-активных веществ, входящих в состав РПП. При слиянии полимерных частиц высвобождаются ПАВ, которые были использованы для их стабилизации. Эти ПАВ стабилизируют воздушную пену и сорбируются цементными частицами, а также продуктами их гидратации. Следствием увеличения подвижности (пластичности) цементных смесей, модифицированных РПП, является улучшение растекаемости и придание смесям свойства самовыравнивания, что при сохранении заданной пластичности позволяет в ряде случаев уменьшить В/Ц, а также обеспечить устойчивость к сколжению при нанесении растворных смесей на вертикальные поверхности.

Второе важное свойство растворной смеси, на которое влияют РПП, – это водоудерживающая способность, которая повышается при увеличении дозировки РПП (и, следовательно, величины П/Ц). Водоудерживающая способность смесей, модифицированных РПП, по сравнению с исходной цементной композицией возрастает по двум причинам. Во-первых, из-за водоудерживающих свойств самих частиц полимера, характеризующихся высокой удельной поверхностью и проявляющих коллоидные свойства. Во-вторых, вследствие замедления испарения воды при образовании мембран (пленок), что обусловлено агломерацией (слиянием) полимерных частиц, перекрывающих пути диффузии и испарения воды и удерживающих ее в массе растворной смеси. Этот фактор особенно важен для уменьшения процесса высыхания при твердении на воздухе. Третьим положительным фактором, связанным с присутствием в растворной смеси РПП, является уменьшение расслоения смеси и снижение выделения на поверхности растворной смеси «цементного молочка». Оба эти явления определяются гидрофильностью и коллоидными свойствами полимерных дисперсий, а также эффектом снижения водопотребности системы под действием ПАВ. При затворении ПАВ из полимерной дисперсии сорбируются цементными частицами, следствием чего является часто наблюдаемое замедление сроков схватывания растворных смесей.

Агломерация (коалесценция) частиц полимерной дисперсии при отвердевании растворной смеси может происходить только при температурах, превышающих минимальные

температуры пленкообразования данной дисперсии, для чего необходимы определенные термовлажностные условия, не совпадающие с теми, которые являются оптимальными для твердения цемента. Так, если для твердения цемента необходима 100%-ная относительная влажность воздуха или даже водная среда, то сближение полимерных частиц, необходимое для их последующей агломерации, возможно лишь при обезвоживании системы; образование полимерной пленки также требует сухих условий (низкой относительной влажности воздуха). Исходя из этого, оптимальным термовлажностным режимом для твердения цементных растворных смесей, содержащих РПП, является комбинированный режим: обеспечение влажного твердения на ранних стадиях (на воздухе при 95... 100%-ной относительной влажности воздуха) в течение 1...2 сут, после чего – твердение на воздухе при относительной влажности ~50%.

Физико-механические характеристики затвердевшего раствора являются результатом отвердевания и цементной матрицы, и полимерных мембран, ее модифицирующих. Для самой цементной матрицы характерна высокая прочность при сжатии (~20...50 МПа в 28 сут) при относительно невысоком сопротивлении разрыву и изгибу (4...7 МПа в 28 сут). Образование полимерцементных структур ведет к повышению прочности при разрыве и изгибе на 5...20% при изменении полимерцементного отношения в пределах 0,02...0,2, что объясняется свойствами самой полимерной пленки, для которой характерна высокая прочность при разрыве и изгибе. В то же время цементные растворы снижают прочность при сжатии в присутствии РПП, что кроме низкого сопротивления сжатию самой полимерной смолы связано также с воздухововлечением в растворную смесь. Если снижение прочности при сжатии раствора нежелательно, определенная компенсация снижения прочности может быть достигнута за счет использования добавок-пеногасителей.

Наибольшее влияние РПП оказывает на прочность сцепления раствора с подложкой (основанием). Достижимый положительный эффект в этом случае объясняется собственной клеящей способностью образующейся полимерной пленки (доменов смолы), адгезия которой к основанию значительно превышает адгезию С-S-H геля, тем более в начальные сроки твердения, когда продуктов гидратации цемента немного. Со временем вклад цементной составляющей в прочность клеевого шва увеличивается, однако не достигает адгезионной прочности органической части. Фирмы-производители РПП приводят микрофотографии, полученные методом электронной растровой микроскопии, фиксирующие образование мостиков (доменов) смолы на поверхности отрыва. Наибольшее влияние РПП на повышение адгезии к основанию оказывает на «нетипичные» поверхности: дерево, ДСП, полистирол, окрашенные поверхности и др., адгезия к которым чисто цементных составов особенно мала.

Результатом действия РПП на растворную смесь во многих случаях является снижение величины капиллярного водопоглощения из-за снижения общей и капиллярной пористости, а кольтматация крупных пор строительного раствора полимерной смолой приводит к снижению водопроницаемости. При введении РПП наблюдается также уменьшение паропроницаемости затвердевших растворных смесей, особенно заметное для систем с относительно высоким значением П/Ц > 0,1. Этот фактор может оказаться важным, особенно для шпатлевок и штукатурок, предназначенных для реставрационных работ.

В отличие от показателя водостойкости классических цементно-песчаных растворов, коэффициент водостойкости которых (отношение прочности после погружения в воду к исходной прочности) близок или превышает 1, водостойкость растворов, модифицированных РПП, снижается, особенно у образцов, предварительно твердевших на воздухе. Этот факт объясняется частичным редиспергированием (вторичным диспергированием в воде) частиц РПП, еще не успевших образовать агломерированные домены в твердеющей системе. Вторичное высушивание образца восстанавливает прочность.

Повышение сопротивления удару и истиранию цементных композиций, содержащих РПП, связывают с увеличением эластичности и прочности контакта цементно-полимерного

вяжущего с заполнителем. Повышение морозостойкости таких композиций является следствием снижения капиллярной пористости и возрастания объема резервных пор, доступных для замерзающей воды. К положительным свойствам РПП необходимо отнести также уменьшение усадки твердеющих растворов и повышение их трещиностойкости. Возникшие при твердении из-за внутренних напряжений мелкие трещины как бы склеиваются и зализываются полимерной смолой.

Применение *воздухововлекающих добавок* преследует главную цель – повышение морозостойкости растворов и бетонов за счет создания системы дополнительных «резервных» пор путем распределения оптимального количества воздушных пузырьков определенного размера в структуре цементного камня. В эти резервные поры отжимается вода при замерзании насыщенного водой камня. Модифицирование бетонов воздухововлекающими добавками подробно рассмотрено в [2]. Система распределенных замкнутых воздушных пор в цементном камне является способом релаксации (ослабления) внутренних напряжений в камне и повышения его трещиностойкости. Сопутствующим явлением при введении воздухововлекающих добавок является их пластифицирующее действие («шарикоподшипниковое» действие пузырьков воздуха), некоторое уменьшение плотности раствора (бетона), а также снижение опасности водоотделения и расслоения. Воздухововлекающие добавки, являясь ПАВ и представляя собой длинноцепочечные молекулы с полярными группами, концентрируются на поверхности раздела фаз воздух-вода, снижают поверхностное натяжение воды (водных растворов) и обеспечивают стабильность воздушных пузырьков. Внутренняя поверхность воздушного пузырька содержит неполярные концы адсорбированных молекул, гидрофобные свойства которых препятствуют проникновению воды и разрушению пузырьков воздуха при перемешивании смеси или ее укладке. Таким образом, при введении воздухововлекающих добавок (ПАВ) в смесь вовлекается воздух и образуется стабильная пена, которая сохраняется в растворной смеси, а затем фиксируется твердеющим С-S-H гелем в виде сферических пор. Чтобы не произошло ухудшения строительно-технических свойств цементного камня, количество таких пор должно быть ограничено и не превышать 2...4% по объему. Наиболее эффективные поры характеризуются диаметром 10...250 мкм при расстоянии между ними 100...200 мкм. Для формирования требуемой пористой структуры время перемешивания растворной смеси и концентрация добавки должны быть строго ограничены, в противном случае содержание воздушных пор и их размер могут превысить допустимые пределы. Воздухововлекающие добавки по своей химической природе, а также из-за их очень малых концентраций в смесях практически не оказывают влияния на кинетику гидратации цемента и состав продуктов гидратации, а лишь несколько увеличивают объем вовлеченного воздуха по сравнению со смесью без добавок. Но главный эффект их действия – это уменьшение размеров воздушных пузырьков и их сохранение (стабилизация) как в растворной (бетонной) смеси, так и в растворе (бетоне). Без воздухововлекающих добавок большая часть воздуха вовлеченного (захваченного) при перемешивании смеси, быстро улетучивается, оставшийся же в смеси воздух образует достаточно крупные пустоты неправильной формы, ухудшающие свойства раствора (бетона).

Влияние *ускорителей схватывания и твердения* в составе цементных сухих смесей сводится в основном к их воздействию на процессы гидратации цементных минералов и цемента в целом. Классическим ускорителем схватывания и твердения цемента является хлорид кальция, однако в составе сухих смесей он не применим из-за своей гигроскопичности, а также из-за отрицательного влияния иона хлора на коррозию арматуры. Последнее существенно ограничивает применение этого соединения также и в растворах (бетонах), изготавливаемых по классической технологии. Перечень некоторых добавок – ускорителей схватывания и твердения, рекомендуемых для использования в составах ССС, приведен в главе 4.

Следует отличать «ускорители схватывания», т.е. добавки, сокращающие период начала и конца схватывания цемента, от «ускорителей твердения», хотя в отдельных случаях добавка может быть ускорителем как схватывания, так и твердения. Ускорители схватывания могут не только не изменять скорость гидратации после схватывания, но в некоторых случаях даже замедлять гидратационные процессы и снижать прочность цементного камня. Так, например, действуют такие известные ускорители схватывания, как карбонаты калия и натрия (поташ, сода), гидросиликат натрия, алюминат натрия. В отличие от ускорителей схватывания ускорители твердения или не влияют на начало и конец схватывания, или повышают прочность камня как в начальные сроки (1...3 сут), так и в более длительные. Цели применения ускорителей схватывания и ускорителей твердения разные: первые вводятся в смесь для ускорения процесса потери пластичности растворной (бетонной) смесью, а ускорители твердения сокращают время достижения необходимой прочности камня, существенно не изменяя сроков схватывания смеси.

Поскольку процессу твердения всегда предшествует процесс схватывания растворной смеси, действие добавок-ускорителей твердения следует рассматривать параллельно с действием добавок-ускорителей схватывания. Условно можно принять, что к последним целесообразно относить добавки, влияющие на систему до момента ее перехода в состояние «землисто-рыхлой консистенции», т.е. до условной прочности $\sim 0,15$ МПа (начало схватывания), $\sim 0,5$ МПа (конец схватывания). Добавки, повышающие прочность выше этого предела (на 30 % и более по сравнению с контрольным образцом), можно рассматривать как добавки-ускорители твердения. Эффективные добавки-ускорители твердения повышают начальную прочность образцов в возрасте 1...3 сут не менее, чем на 30 %, а марочную прочность (в возрасте 28 сут) – на 20 % и более.

По существу, любая водопонижающая (пластифицирующая) добавка является упрочнителем, если испытания проводить при пониженном значении В/Ц, однако наиболее перспективны комплексные добавки-упрочнители полифункционального действия, обеспечивающие повышение прочности без снижения В/Ц. Примером такой добавки может быть микрокремнезем в сочетании с суперпластификаторами. Применительно к традиционным бетонам применение полифункциональных модификаторов (ПФМ) рассмотрено в.

Механизм действия добавок-ускорителей схватывания и твердения цемента достаточно сложен и не может считаться надежно установленным. Влияние их сводится к ускорению гидратации цементных минералов. Добавки этого типа не влияют на состав С-S-H геля (соотношение CaO/SiO_2 , $\text{H}_2\text{O}/\text{SiO}_2$), однако в их присутствии меняется морфология образующихся гидросиликатов. Существенное **влияние** на твердение оказывают обменные реакции добавок с фазой **портландита** ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) твердеющего цемента, что ведет к образованию труднорастворимых гидроксидов, основных солей или солей кальция. **Влияние этих соединений** на свойства цементного теста достаточно разнообразно и зависит от концентрации соли, вида катиона и аниона. Так, например, ускоряющее действие карбонатов объясняют увеличением диффузионной проницаемости защитного слоя и удалением ионов Ca^{2+} из раствора. Формиат кальция увеличивает степень протекания начальной стадии гидратации C_3S , но заметно не влияет на продолжительность индукционного периода и последующие стадии реакции гидратации. Некоторые особенности быстрого схватывания смесей портландцемента и глиноземистого цемента рассмотрены в разд. 6.6. К сожалению, до сих пор не найден пригодный для сухих смесей ускоритель твердения, приближающийся по эффективности своего действия к хлориду кальция.

Добавки-замедлители схватывания используют при твердении бетонов в условиях повышенных температур, а также для компенсации ускоряющего эффекта других функциональных добавок. Примерами составов требующих применения замедлителей схватывания, могут быть смеси для устройства полов, некоторые ремонтные растворы, а также практически все

составы на основе гипса. Перечень добавок-замедлителей преимущественно органической природы (соли лимонной, винной кислот, сахароза, глюконата кальция) приведен в главе 4. Добавки-замедлители схватывания достаточно эффективны в небольших концентрациях, при этом замедление схватывания вызывается адсорбцией добавок на продуктах гидратации цемента, особенно на $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а также на поверхности исходных негидратированных минералов. На результат действия добавки оказывает влияние состав исходного цемента, содержание в нем щелочей, количество вводимого замедлителя, температура применения и т.д. Сроки схватывания удлиняются при повышении концентрации замедлителя и сокращаются при повышении температуры и количества цемента в смеси. Например 0,1 %сахарозы от массы цемента удлиняет срок начала схватывания с 4 ч до 14 ч, а всего лишь при 0,25 %начало схватывания наступает через 6 у [53] Большая часть введенного замедлителя расходуется на алюминатные фазы цемента, поэтому эффект действия добавок лучше проявляется в низкоалюминатных цементах, а также в цементах с минимальным содержанием щелочей, поскольку последние разрушают добавку. Все рекомендации по использованию добавок этого типа являются весьма приближенными и требуют обязательной корректировки в зависимости от вида используемого сырья. Следует иметь в виду, что во многих случаях замедление схватывания смесей на основе портландцемента является побочным эффектом введения других целевых добавок, причем их влияние может оказаться весьма значительным. Например, замедление сроков схватывания может быть результатом введения добавок-пластификаторов (водопонизителей), водоудерживающих и загущающих, и др. Тем не менее во многих случаях проблема выбора замедлителей схватывания для цементных смесей существует, а для смесей на основе гипса является особенно актуальной.

Гидрофобные добавки, применяемые для объемной гидрофобизации строительных растворных смесей, в силу специфики сухого смешения должны вводиться в виде тонкоизмельченных твердых веществ. Некоторые сведения о различных типах таких веществ – солях жирных кислот, силиконовых смолах на носителях и добавках комплексного действия – приведены в главе 4, а общие вопросы гидрофобизации рассматриваются в разд. 6.8.

Гидрофобизация достигается путем «механической гидрофобизации» – введением в состав сухой смеси гидрофобной фазы – инертного порошка с большим углом смачивания ($> 90^\circ$), поэтому получаемый эффект определяется только концентрацией добавки, тонкостью ее помола и равномерностью распределения в смеси. При таком способе гидрофобизации получение заметного эффекта возможно лишь при сравнительно большой концентрации гидрофобизатора в смеси (1...2 %), небольших размерах его частиц (~ 10 мкм) и их гомогенном распределении в смеси. Для сравнения, при гидрофобизации, основанной на способах сорбции из газовой среды или осаждении из жидкой фазы, требуемая концентрация гидрофобизатора, как правило, на один порядок меньше. Поскольку введенные гидрофобные вещества химически инертны по отношению к цементным минералам, можно было бы ожидать, что их влияние на гидратационные процессы и технические свойства камня будет минимальным, однако на самом деле это не так. Кроме условий перемешивания (ухудшение смачивания порошка водой) в присутствии гидрофобизаторов наблюдается повышенное воздухововлечение, что может быть причиной снижения прочности. В ряде случаев фиксируется также снижение прочности сцепления раствора с основанием (подложкой). Тем не менее главный эффект – снижение капиллярного водопоглощения – достигается, что является основой повышения долговечности материала и его устойчивости к высолообразованию. Такие гидрофобные вещества, как, например, стеараты кальция, стеараты цинка и т.п., относят к неактивным гидрофобным агентам, химически не взаимодействующим с компонентами растворной смеси. В отличие от них, другие гидрофобные агенты, например олеат натрия, являются активными и химически взаимодействуют с гидроксидом кальция, образуя нерастворимые соли (кальциевые мыла). Для завершения этой реакции необходимо определенное

время, поэтому гидрофобный эффект проявляется не сразу, и это позволяет сократить время перемешивания смеси с водой (по сравнению с неактивными гидрофобными агентами), что дает возможность применять добавки активного типа при машинном приготовлении смесей.

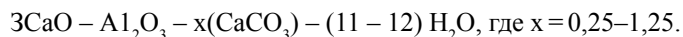
Действие **противоморозных добавок** сводится к созданию условий, обеспечивающих сохранение воды затверения в жидком состоянии при отрицательных температурах, что является совершенно необходимым для протекания процессов гидратационного твердения цемента. Из большого количества химических веществ, снижающих температуру замерзания воды до -10°C и даже до -20°C , для практического использования пригоден ограниченный перечень соединений (ГОСТ 24211), при этом необходимо принимать во внимание дополнительные требования к сухим смесям по содержанию ионов хлора и гигроскопичности. Однако это только одна сторона проблемы противоморозных добавок. Вторая состоит в том, что даже при сохранении воды в жидком состоянии при низких и отрицательных температурах гидратационные процессы протекают столь медленно, что требуют либо применения специальных высокоактивных (с повышенной экзотермией реакций гидратации) быстротвердеющих цементов, либо применения добавок-ускорителей твердения, сохраняющих эффективность своего действия при пониженных температурах. Перечень таких добавок, применительно к условиям использования в составах ССС, также весьма ограничен. Кроме этого, необходимо обеспечить условия пленкообразования при низких температурах для составов, содержащих редиспергируемые полимерные порошки (РПП с температурой МТ11 около 0°C , использование коалесцентов).

До определенного этапа развития технологии цементных растворов и бетонов приемы **уменьшения усадочных деформаций** при высыхании сводились к подбору оптимального соотношения и гранулометрии заполнителей, а также к конструктивным мероприятиям: устройству температурно-усадочных швов, разделению конструкции на отдельные элементы и увеличению степени их армирования.

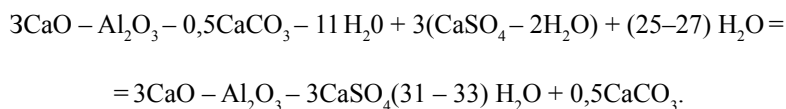
Эти мероприятия сохраняют свое значение и в современном строительстве, однако их эффективность в настоящее время дополнена возможностью регулирования деформативных свойств твердеющих растворов (бетонов) за счет применения цементов с контролируемой величиной деформаций при твердении: безусадочных, расширяющихся и напрягающих. Во всех известных случаях производство таких цементов базируется на введении в их состав расширяющихся компонентов (РК), увеличивающих свой объем в ходе гидратации и твердения цементного камня. Альтернативным решением проблемы является введение РК не в цементы, а непосредственно в растворные или бетонные смеси на рядовом портландцементе, в том числе и в ССС.

Таковыми расширяющимися компонентами могут быть некоторые соединения, увеличивающиеся в объеме при гидратации, например, негашеная известь и каустический магнезит, однако из-за технологических сложностей, связанных с обеспечением стабильности свойств конечного продукта, вышеназванные вещества и составы на их основе применяют крайне редко. Наиболее приемлемым решением проблемы выбора расширяющегося компонента в мировой практике является реализация в цементном камне гидросульфоалюминатного (этtringитового) расширения при введении в состав цемента (или бетона) глиноземсодержащего (алюминатного) компонента и одной из форм сульфата кальция. Поскольку выбор и применение сульфатного компонента обычно не вызывают сложностей, решение проблемы РК сводится к обоснованию применения того или иного глиноземсодержащего компонента, способного к регулируемому взаимодействию с сульфатом кальция для синтеза в цементном камне дополнительного количества этtringита. Такими компонентами могут быть, например, металлургические шлаки или клинкеры и цементы, содержащие алюминаты кальция, прокаленные горные породы – алуниты ($\text{KA}1_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), специально синтезированные сульфоалюминатные клинкеры и др.

Одним из примеров глиноземсодержащего расширяющегося компонента для безусадочных и расширяющихся цементов и растворов (бетонов) является гидрокарбоалюминат кальция (ГКА) – продукт гидрохимического промышленного синтеза, содержащий в качестве основной фазы ненасыщенный твердый раствор ангидрида угольной кислоты в четырехкальциевом гидроалюминате. Состав гидрокарбоалюмината может быть представлен следующей формулой:



При твердении растворных смесей, содержащих гидрокарбоалюминат кальция и соответствующее стехиометрии количество дигидрата сульфата кальция, имеет место реакция образования фазы этtringита:



Характер влияния этой реакции на объемные деформации твердеющей системы зависит от реакционной способности реагирующих компонентов, от особенностей кристаллизации (морфологии) новообразований, условий заполнения ими порового пространства, соотношения скорости формирования прочности цементного камня и кинетики формирования новообразований. Реакция образования этtringита является основой компенсации усадочных деформаций и при использовании других типов РК как на основе алюминатов, сульфоалюминатов, так и активного глинозема.

Другая группа добавок (Peramin, Metolat) обеспечивает противоусадочное действие за счет образования органо-минеральных гидроколлоидов, не обладающих расширяющим действием, но предотвращающих усадку материала за счет воздействия на механизм усадочных деформаций. Добавка Peramin, по данным производителя, снижает усадку на 50 % как на стадии существования пластичной растворной смеси, так и на стадии формирования прочности раствора; по истечении года наблюдается снижение усадочных деформаций на 30 %. В качестве побочного эффекта при передозировке и при низких температурах наблюдается замедление схватывания смеси. Рекомендуемая дозировка – 0,3...0,5 % от массы сухой смеси.

Бактерии, грибки, мхи, поселяясь на поверхности цементного камня, могут приводить к его значительной **биохимической коррозии**. В цементном камне в результате жизнедеятельности этих организмов выделяются химические вещества, разрушающие как сам камень, так и стальную арматуру. Эти вещества представляют собой органические и неорганические кислоты, являющиеся продуктами протекающих биохимических процессов. Кислоты, постоянно выделяясь из микроорганизмов, постепенно растворяют составные части цементного камня. Пористость поверхности камня, влажность, умеренные температуры являются благоприятными условиями для размножения грибов, особенно в условиях, связанных с жизнедеятельностью человека (в душевых, на кухнях, спортивных залах, цехах пищевых предприятий). Для предотвращения биокоррозии используют добавлен – фунгициды (защита от грибов) и бактерициды (защита от бактерий). Наиболее известные фунгициды – медные соли уксусно-мышьяковистой и мышьяковистой кислот – вызывают потерю подвижности бетонных смесей, снижение прочности бетона и довольно быстро выщелачиваются. При применении в качестве бактерицидной добавки многоалюидных фенолов рекомендуется предварительная обработка ими цемента. В этом случае характер гидратации цемента не изменяется. Катионоактивные ПАВ (соединения четвертичного аммония), например ката-мин (АБ), эффективны в качестве бактерицидной добавки при развитии бактерий, вызывающих кислотную коррозию из-за выделения в продуктах их жизнедеятельности серной кислоты или низкомолекулярных карбоновых кислот – муравьиной, уксусной, молочной, масляной.

3.13. Определение свойств строительных смесей

Свойства строительных смесей и материалов на их основе определяются:

- качеством компонентов;
- составом смесей (оптимальный выбор и соотношение компонентов);
- качеством смешения;
- правильностью обоснования (проектирования) свойств и определения параметров растворных смесей и растворов (водопотребность, водоудерживающая способность, консистенция, живучесть и др.);
- технологией приготовления смесей (точность дозирования компонентов, порядок их введения, длительность цикла смешения, качество перемешивания и т. п.);
- свойствами оснований (химическая природа, пористость, влажность и др.) и условиями их подготовки (необходимость сушки или увлажнения, шероховатость, очистка от загрязнений, предварительная пропитка и т. п.);
- условиями проведения работ (влажность и температура окружающей среды, наличие воздушных потоков и др. воздействий);
- условиями формирования свойств растворов во времени (защита от высыхания, обеспечение стабильного температурно-влажностного режима, защита от замораживания, предохранение от действия стационарных и знакопеременных механических нагрузок (сжатие, изгиб, вибрации и др.).

Действующие нормативные документы (уже цитировавшиеся ранее ГОСТы, СНиПы, Своды правил по строительству) определяют основные требования к строительным растворным смесям и растворам и регламентируют методики оценки их свойств (ГОСТ 5802), однако прогресс в развитии строительного материаловедения, отмеченный в России в последнее время в связи с появлением на рынке большого количества различных функциональных добавок, в том числе добавок нового типа – редиспергируемых полимерных порошков, сложных эфиров целлюлозы, различных загустителей – эфиров крахмала, целлюлозных волокон и др., некоторых видов ускорителей схватывания и твердения, диктует как необходимость разработки и применения отечественных аналогов этих компонентов, так и вызывает потребность расширения методов контроля качества сырьевых материалов, сухих строительных смесей и получаемых на их основе материалов и изделий. Частично это учтено в недавно введенных стандартах ГОСТ 31356, ГОСТ 31357 и ГОСТ 31358.

Следует отметить, что специфика производства СССР, некоторые особые свойства растворных смесей и растворов на их основе (например, такие как воздухоовлечение, гидрофобные свойства, особые вязко-пластические свойства – проявление тиксотропии, необходимость контроля и регулирования паропроницаемости, водопоглощения и др.), большое разнообразие условий применения и эксплуатации новых материалов (санирующих штукатурных растворов, клеев для монтажа облицовочных плиток, самонивелирующихся составов, проникающей гидроизоляции и пр.) требуют пересмотра действующей нормативной базы, ориентированной в основном на традиционные типы строительных растворов. Есть настоятельная необходимость расширения стандарта на гипсовые вяжущие включением в него ангидритового вяжущего, внесение дополнений в стандарт на магнезиальные вяжущие вещества. Отсутствуют нормативные требования к ряду материалов, уже весьма распространенных в строительной практике. В большинстве случаев они выпускаются по ТУ производителей, чаще всего не заинтересованных в расширении числа контрольных показателей, определяющих качество материалов, поэтому в паспортные данные входят, как правило, лишь самые общие характеристики: цвет (визуальная оценка), водопотребность, время пригодности к работе, интервал температур применения, расход на 1 м² поверхности, срок хранения и прочность при сжатии (иногда и при изгибе) или прочность сцепления с ос-

нованием. Из всего набора перечисленных свойств лишь последние из показателей могут служить потребителю юридическим основанием для предъявления претензий по качеству продукции, но и в этих случаях по ряду причин, обусловленных методическими факторами (например, несоответствия данных лабораторных оценок и реально достигаемых на практике показателей), потребитель будет «всегда не прав».

В связи с развитием производства ССС необходимой является переработка ГОСТ 25328 «Цемент для строительных растворов»; требуются общероссийские стандарты и на такие виды вяжущих, как кладочные цементы.

Следует также внести некоторые дополнения в требования стандартов к заполнителям в части оценки их дисперсности (регламентирование гранулометрического состава) вместо малоинформативной с позиций взаимосвязи состав-свойство характеристики заполнителя – модуля крупности. На наш взгляд, вполне назрел вопрос о разработке стандарта на наполнители для ССС. Требуются изменения в нормативной базе, определяющей области применения, состав и свойства функциональных добавок. Работа, которая позволила бы обосновать и внести соответствующие изменения в действующие стандарты и разработать новые нормативные документы, чрезвычайно трудоемка, требует проведения достаточно длительной экспериментальной проработки. Более реальным подходом, по-видимому, является поэтапное движение вперед, в основу которого должна быть положена разработка нормативов на отдельные виды ССС. Организаторами и финансовой опорой таких разработок могут явиться сами производители ССС, а координирующие функции взять на себя их отраслевая организация – Союз производителей сухих строительных смесей. Такой подход позволит повысить качество выпускаемой продукции и явится основой для формулирования таких требований к качеству компонентов ССС, которые побудят отечественных производителей ввести необходимые коррективы в их ассортимент и качественные показатели.

В целом проблема соответствия основных материалов (цементных, гипсовых, известковых вяжущих и др., заполнителей, наполнителей и функциональных добавок) требованиям производств сухих строительных смесей, как и строительных растворов (бетонов), производимых на стройплощадках, с учетом ее технической и экономической значимости, по нашему мнению, имеет большое значение. Очевидно, что без внимания не может оставаться и проблема организации производства оборудования (различного уровня сложности) для проведения испытаний. В связи с отсутствием в действующих отечественных стандартах некоторых методик определения свойств строительных растворных смесей и растворов, имеющих важное значение для оценки качества отдельных видов сухих строительных смесей (клеев для монтажа облицовочных плиток, самонивелирующихся растворных смесей, некоторых видов штукатурных растворов и др.), на практике в настоящее время приходится ориентироваться на методики зарубежных стандартов путем их адаптации, а также пользоваться рекомендациями (нередко описательными) различных фирм-производителей ССС и функциональных добавок.

В настоящей главе приводятся сведения о некоторых нестандартных и специфических методиках определений качества компонентов ССС, растворных смесей и растворов на их основе. Излагаются некоторые методы экспрессной оценки качества компонентов и смесей, приводятся сведения об упрощенных (практических) методиках оценки некоторых свойств, даются рекомендации, позволяющие сократить затраты материалов и времени при экспериментальной отработке рецептур ССС, приведены методики, описание которых в действующих стандартах содержит неточности или ошибки. Данные о специальных методиках испытаний конкретных видов строительных смесей рассматриваются в соответствующих разделах главы 3.

3.14. Определение качества минеральных компонентов сухих строительных смесей

К основным минеральным компонентам ССС относятся вяжущие вещества неорганической природы (цементы, гипсовые, известковые, силикатные (на основе растворимого стекла) и магнезиальные вяжущие), минеральные заполнители и наполнители. В составе ССС могут присутствовать и другие минеральные вещества, например, загустители на основе глинистых минералов (бентонитового типа), неорганические носители поверхностно-активных веществ (например, на основе дисперсного кремнезема), антислеживатели (в составе РПП), противоусадочные добавки (на основе кремнезема или активного гидроксида алюминия), ускорители схватывания, твердения и др. В настоящее время большая часть этих материалов поставляется на российский рынок зарубежными производителями, качество их гарантируется и в достаточной степени регламентируется сопроводительной документацией и, как правило, в дополнительной проверке не нуждается.

Рассмотрим некоторые особенные требования производителей ССС к качеству основных минеральных компонентов.

3.15. Контроль качества цемента и других вяжущих веществ

Основные характеристики минеральных вяжущих, используемых при производстве ССС, представлены в табл. 3.24.

Из всего перечня свойств, подлежащих обязательному контролю при производстве вяжущих (дисперсность, сроки схватывания и др.), методы испытаний которых изложены в соответствующих стандартах, остановимся на показателях вяжущих, требующих особого внимания и учета при изготовлении ССС.

Таблица 3.24

Вяжущие	Плотность, г/см ³	Насыпная плотность, кг/м ³		Остаток на сите, %, не более/№ сита	Нормальная густота (водопотребность)** %, %	Сроки схватывания: начало, мин, не ранее конеч, ч, не позже	Марка вяжущего	Равномерность изменения объема ^б
		в неуплотненном состоянии	в уплотненном состоянии					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Портландцемент (ГОСТ 10178)*	3,0...3,2	900...1300	1500..2000	15/008	21...27	45/10	400,500, 550,600	+
Портландцементы белые (ГОСТ 15825)	2,9...3,2	900...1300	1500..2000	12/008	20...30	45/10	400,500	+
Портландцемент Цветной (ГОСТ 15825)	2,9...3,2	900...1300	1500..2000	10/008	20...30	45/12	300,400, 500	+
Цемент глиноземистый (ГОСТ 969) ³	3,1...3,3	1000..1300	1600..2000	10/008	31...33	45/10	40,50,60	+
Цементы высокоглиноземистые (ГОСТ 969) ⁴	3,1...3,3	1000..1300	1600..2000	10/008	25...30	ВГЦ I – 0/12; ВГЦ II и III – 30/15	ВГЦ I – 35 ВГЦ II – 25, 35 ВГЦ III – 25	-
Вяжущие гипсовые (ГОСТ 125)	2,5...2,7	800...1100	1250..1450	I ⁵ – 23/02 II – 14/02 III – 2/02	45...65	A ⁷ – 2/5; Б – 6/30; В – 20/-	Г-2, Г-3, Г-4, Г-6, Г-7, Г-10, Г-13, Г-16, Г-19, Г-22, Г-25 ⁸	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Известь строительная гидратная (ГОСТ 9179)	2,0... 2,4	400...450	500.. 700	1,5/02; 1,5/008	45...85	-	-	+

* одновременно с ГОСТ 10178 в настоящее время действует ГОСТ 31108, унифицированный с европейским стандартом. ** значения плотности, насыпной плотности и водопотребности носят справочный характер (не нормируются). 1 – коэффициент отражения света (показатель белизны) для белых цементов I, II и III сорта должен быть не менее 80, 75 и 70 % соответственно. 2 – к портландцементам предъявляется требование отсутствия признаков ложного схватывания. 3 – для цементов глиноземистых и высокоглиноземистых цифра в обозначении марки соответствует значению минимальной прочности при сжатии (в возрасте 3 сут), выраженной в МПа (для портландцементов в кг/см²). Для глиноземистых цементов (ГЦ) нормируется также предел прочности при сжатии в возрасте 1 сут, который для цементов марок 40, 50 и 60 должен быть не менее 22,5; 27,4 и 32,4 МПа соответственно. 4 – для высокоглиноземистых цементов нормируется огнеупорность, «С, ВГЦ I, II и III не менее 1580, 1670 и 1750 соответственно. 5 – I, II и III – индексы степени помола, цифры соответствуют максимальному остатку на сите с ячейкой 0,2 мм. 6 – знак «+» соответствует наличию требования, знак «-» – его отсутствию. 7 – буквы обозначают индекс сроков схватывания («сроков твердения» по ГОСТ 125). цифры начало и конец схватывания, мин. 8 – марка соответствует минимальному значению предела прочности при сжатии, МПа. в возрасте 2 ч.

3.16. Влажность ССС

ГОСТ 28013 предъявляет неоправданно жесткие требования (которые практически не могут быть реализованы) к влажности ССС – не более 0,1 % по массе. Принимая во внимание наличие в компонентах остаточной технологической влаги (нередко до 2 % и выше), и присутствие в них низкотемпературной кристаллохимической влаги (дигидрат сульфата кальция) и гигроскопичность (способность адсорбировать влагу), этот показатель должен быть откорректирован в сторону повышения. Реальное значение предельной влажности ССС, как показывает практика, должно ограничиваться на уровне 0,5...1,0 %. Для того чтобы этот параметр не был превышен (увеличение влажности смеси может привести к слеживаемости, падению гидравлических свойств, сокращению сроков хранения), производитель сухой смеси должен учитывать влажность всех компонентов, входящих в состав смеси, и оценивать суммарную влажность смеси с учетом содержания в ней каждого из компонентов. Наибольшее влияние на влажность смесей может оказывать такой их неотъемлемый компонент, как гидратная известь. ГОСТ 9179 на строительную известь допускает наличие в гидратной извести 5 % влаги; таким образом, уже при содержании ее в смеси 10 % доля влаги, внесенной гидратной известью, составит 0,5 %, а ведь некоторые составы смесей содержат гидратную известь и в более высоких концентрациях. Не являются сухими компонентами и гидравлические вяжущие. Так, например, равновесная гигроскопическая влажность портландцемента с активными добавками может достигать 0,5 % и более.

В состав портландцемента входит природный гипс (гипсовый камень), который в соответствии с общепринятой технологией, не сушится и вводится в состав цементной шихты в состоянии естественной влажности. Остаточная влажность, внесенная гипсом в цемент, зависит от условий производства и может меняться в заметных пределах. К этому нужно еще добавить влажность, привнесенную заполнителями, наполнителями и функциональными добавками.

В случае необходимости определения влажности портландцемента температура сушки образца не должна превышать 45...55 °С, так как уже при температуре 65 °С дигидрат сульфата кальция, входящий в состав портландцементов, начинает терять кристаллохимическую воду, и эта потеря, если сушку производить при условиях, обычно принимаемых как стандартные при определении влажности, т. е. при 105 ± 5 °С, будет учтена как физическая влага. Необходимость высказанных замечаний обусловлена тем, что ГОСТ 28013 включает показатель влажности для ССС в число основных, в то же время ГОСТ 5802 «Методы испытаний

строительных растворов» ограничение по температуре сушки относит только к гипсовым растворам. В технической литературе [48] также рекомендуется проводить определение влажности ССС при 105 °С, что приведет к неправильным результатам, причем погрешность будет тем больше, чем выше доля цемента в составе смеси.

Экспрессная методика оценки прочности (активности) цементов. Производителю сухих смесей быстрая оценка показателя прочности цемента необходима для того, чтобы с ее учетом внести коррекцию в рецептуру ССС и в случае, например, пониженной активности цемента обеспечить требуемые характеристики качества путем увеличения доли вяжущего в составе смеси.

Существуют различные методы экспрессной оценки прочностных свойств цемента. Обычно прочность цементов оценивают посредством испытания образцов, изготовленных из цементного раствора состава 1 : 3 на нормальном песке (ГОСТ 310). Измерения производятся в возрасте 28 сут для рядовых и дополнительно в возрасте 3 сут для быстротвердеющих цементов. Для более быстрого получения оценочных результатов период испытаний может быть сокращен до 1 сут. Существуют также ускоренные методы оценки прочности цементов, основанные на использовании методов пропаривания, и т. п. Условия проявления вяжущими веществами прочностных свойств в составах тонкослойных строительных растворов (клеев для производства облицовочных работ, штукатурок, шпатлевок, затирок и т. п.) отличаются от тех условий, в которых испытываются цементы по ГОСТ 310. Основное требование, которое предъявляется к цементу для ССС, заключается в быстром наборе прочности, в т. ч. и в системах с высокой или даже сверхвысокой подвижностью (самонивелирующиеся составы). Быстрая потеря влаги тонкослойными покрытиями также предъявляет повышенные требования к скорости твердения цементов.

Оценку прочностных свойств цементов для ССС, по опыту работы кафедры строительных и специальных вяжущих веществ СПГТИ, удобнее всего проводить путем испытания цемента в образцах из теста. Образцы готовятся в стандартных формах 40 x 40 x 160 мм методом пластического формования из цементного теста нормальной густоты (ГОСТ 310.3). Уплотнение массы осуществляется путем пятикратного удара формы о жесткое основание с высоты ~5 см, после чего образцы выдерживаются при температуре 20 ± 2 °С и влажности > 90 % в течение 24 ч, извлекаются из формы и испытываются по ГОСТ 310.4 на изгиб и сжатие. Экспериментально установлено, что высококачественные портландцементы марки 500 ДО при таком испытании характеризуются пределом прочности при сжатии 23...25 МПа, а при изгибе 2...3 МПа. Если значение прочности цемента, полученное при таком испытании, оказывается ниже 20 МПа, то следует от применения такого цемента (например, в составах смесей для самовыравнивающихся полов) воздержаться и использовать такой цемент в других, менее ответственных за прочностные показатели рецептурах. В отдельных случаях экспрессное определение активности цементов в тесте 1 : 0 может быть выполнено в образцах 3 x 3 x 3 см или 4 x 4 x 4 см (прочность при сжатии).

Контроль ложного схватывания цементов. Ложное схватывание цемента может привести к неверным заключениям о живучести смесей или вызвать подозрения в пригодности отдельных компонентов (или в их совместимости). Цементы с ложным схватыванием требуют большего количества воды для обеспечения необходимой пластичности, что приводит к снижению прочности растворов и увеличивает усадку, связанную с потерей влаги (усадку высыхания). Ложное схватывание может являться причиной затруднения в укладке и обработке растворных смесей.

Суть ложного схватывания состоит в проявлении цементным раствором склонности к загустеванию уже на самой ранней стадии – через 3...5 мин после затворения. Эта потеря пластичности может быть устранена энергичным повторным перемешиванием, после чего растворная смесь продолжает схватываться и твердеть, как и обычная. ГОСТ 10178,

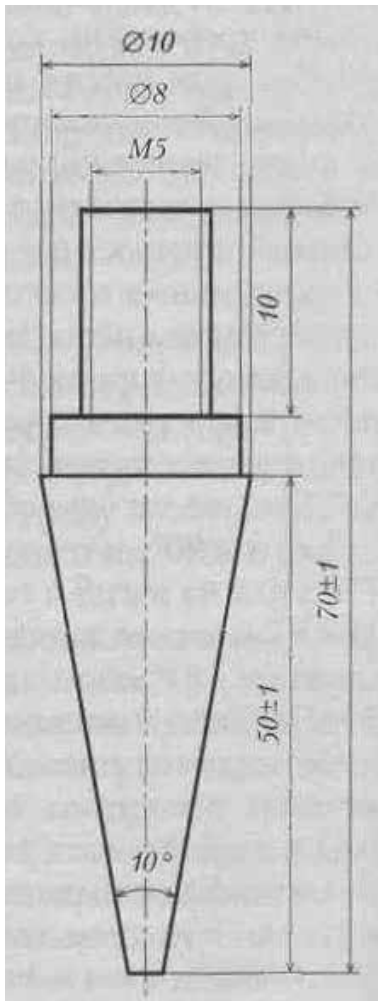


Рис. 3.18. Наконечник к прибору Вика для контроля ложного схватывания цементов

ГОСТ 965, ГОСТ 15825 требуют от изготовителя испытывать продукцию на наличие признаков ложного схватывания. Методика данного испытания предложена институтом НИИцемент (Москва) РМ 21–0284330–01–86 «Определение ложного схватывания цемента».

В качестве основного оборудования для проведения этого испытания служит модифицированный прибор Вика, в подвижную часть которого вместо иглы вставляют конус со срезанной вершиной (площадь среза вершины $\ll 4 \text{ мм}^2$). Конус с углом 10° выполнен из нержавеющей стали и имеет отполированную поверхность. Размеры конуса приведены на рис. 3.18. При испытаниях на ложное схватывание используется также специальная прямоугольная форма для растворной смеси, которая имеет в плане внутренние размеры $(150 \pm 1) \times (50 \pm 1) \times (50 \pm 1) \text{ мм}$.

Стенки и дно формы выполнены из стали толщиной $\sim 4 \text{ мм}$. Чертеж формы приведен на рис. 3.18. Масса перемещающейся части формы прибора Вика должна быть в пределах $285 \pm 2 \text{ г}$. Шкала прибора Вика должна иметь цену деления 1 мм и диапазон измерения от 6 до 50 мм .

Определение ложного схватывания проводится на цементно-песчаной растворной смеси состава $1 : 1$ при $B/C = 0,35$ и консистенции не ниже 200 мм по распылу стандартного конуса на встряхивающем столике. Испытания выполняются на двух отдельно приготовленных порциях раствора – после первоначального и при повторном перемешивании.

Для приготовления растворной смеси используется стандартный песок для испытаний цемента (ГОСТ 6139), который в количестве 600 г смешивается с таким же количеством цемента. Сухие компоненты помещаются в сферическую чашу, пред-

варительно протертую влажной тканью. После перемешивания сухой смеси в течение мин к ней приливают 210 г воды и перемешивают растворную смесь без растирания в течение 2 мин (первоначальное перемешивание). Если распыл конуса оказывается меньше 200 мм ,

то количество воды увеличивают до получения распыла конуса в пределах $200 \dots 210 \text{ мм}$. Форму для испытаний цемента на ложное схватывание заполняют растворной смесью с небольшим избытком. Уплотнение смеси производится путем трехкратного постукивания формы о стол, приподнимая ее на высоту около 50 мм . Излишек смеси срезают ножом и заглаживают ровень с краями формы.

Заполненную смесь форму ставят на основание прибора Вика, приводят конус в соприкосновение с поверхностью раствора и измеряют глубину погружения конуса в растворную смесь через 5 мин с момента затворения, продолжая измерения в течение не менее 1 ч . Конус после каждого погружения вытирают, а форму передвигают, погружая конус каждый раз в новое место. Отсчет глубины погру-

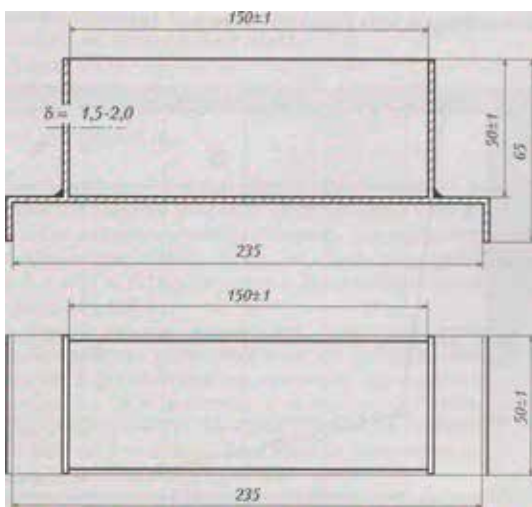


Рис. 3.19. Форма к прибору Вика для растворной смеси

жения производят через 15 с после освобождения стержня прибора Вика. В ходе испытания прибор с формой и растворной смесью должен быть защищен от сквозняков и не подвергаться сотрясениям.

В том случае, если через 15 мин с момента затворения глубина погружения конуса в раствор после первоначального перемешивания окажется менее 15 мм, выполняют испытание на другой порции растворной смеси, которая после первоначального перемешивания оставляется в чаше в покое, при этом чашу закрывают влажной тканью, защищая растворную смесь от высыхания. Повторное перемешивание раствора в течение 1 мин выполняют через 8 мин с момента затворения смеси, после чего производят укладку раствора в форму и его уплотнение. Глубину погружения конуса в растворную смесь после повторного перемешивания измеряют через 10 мин от начала затворения с последующими пятиминутными интервалами в течение не менее 1 ч с момента затворения.

По результатам двух измерений глубины погружения конуса (после первоначального (однократного) перемешивания и после первоначального и повторного (двукратного) перемешивания) строят кривые структурообразования в координатах «время с момента затворения, мин – глубина погружения конуса, мм» (пример см. на рис. 3.20).

Цемент характеризуется наличием ложного схватывания, если глубина погружения конуса в раствор через 15 мин с момента затворения составляет менее 15 мм, а через 1 ч с момента затворения – менее 10 мм. При этом после повторного перемешивания раствора рост пластической прочности (глубина погружения конуса в раствор менее 50 мм) начинается не ранее 30 мин с момента затворения. Цемент характеризуется как быстросхватывающийся, если после первоначального перемешивания растворной смеси в течение 15 мин от начала затворения происходит полная преждевременная потеря пластичности, и аномальный вид кривой, характеризующей ход структурообразования, сохраняется после повторного перемешивания.

Испытание цементов на ложное схватывание предусматривается стандартами и других стран. Так, стандартом ASTM предлагается две методики испытаний цементов на ложное схватывание: метод испытаний в тесте ASTM C451 и метод испытаний в растворе ASTM C359.

3.17. Контроль качества гидратной извести

При контроле качества гидратной извести по ГОСТ 9179 определяют следующие показатели:

- содержание активных CaO и MgO ;
- содержание CO_2 ;
- время гашения;
- влажность;
- степень дисперсности.

Обязательным является испытание на равномерность изменения объема. Этот вопрос достаточно подробно обсуждается в разд. 6.4. К излагаемому в этом разделе материалу можно добавить, что метод испытания на равномерность изменения объема смеси, по принципу схожий с методикой, предлагаемой в ASTM C110, включен в Европейский норматив на строительную известь EN459–2.

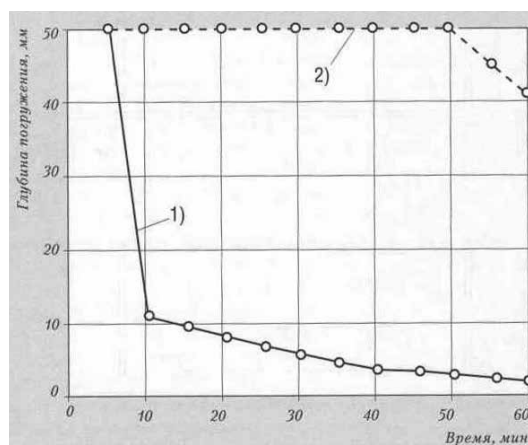


Рис. 3.20. Кривые, характеризующие первоначальное (1) и повторное (2) затворения

Помимо перечисленных показателей, желательно дополнительно определять такие свойства гидратной извести, которые непосредственным образом связаны с формированием основных характеристик растворных смесей, а значит, и с их рецептурой. Это, в первую очередь, пластические свойства гидратной извести, ее водопотребность и водоудерживающая способность. Эти свойства гидратной извести в перечень нормативных показателей ГОСТ 9179 не включает.

В принципе, названные характеристики гидратной извести взаимосвязаны, и можно ограничиться определением только одной из них. Наиболее просто можно определить водопотребность извести. В качестве методики определения водопотребности можно воспользоваться определением количества воды затворения, необходимого для приготовления известкового теста требуемой пластичности.

Характеристика пластичности гидратной извести осуществляется по методу определения распыла стандартного конуса из известкового теста на встряхивающем столике по ГОСТ 310.4. Водопотребность характеризуется количеством воды в процентах от массы извести, необходимой для получения распыла на встряхивающем столике 180 ± 2 мм, после 15 встряхиваний. Известковое тесто готовится путем смешения 300 г извести с необходимым количеством воды. Перемешивание осуществляется в чаше в течение 3 мин. Испытание должно быть завершено в течение 10 мин после добавления воды. Заполнение конуса тестом ведется в два приема. Каждый слой уплотняется 10 штыкованиями при помощи стержня диаметром 20 мм. Избыток теста срезается линейкой. Конус снимается через 10...15 с после его заполнения тестом, после чего смесь подвергается встряхиванию. Измерение диаметра распыла осуществляется в двух перпендикулярных направлениях, на основании которых рассчитывается значение диаметра распыла. Для высокопластичных известей водопотребность может быть более 85 %.

Водоудерживающую способность извести можно оценить, основываясь на методике, которая используется при определении водоудерживающей способности строительных растворных смесей по ГОСТ 5802 п. 5. Идентичный метод определения водоудерживающей способности строительной извести входит в состав Европейского норматива EN459–2 «Строительная известь. Часть 2. Методы испытаний». В соответствии с EN459–2 испытывается известково-песчаный раствор состава 1 : 3 (по объему). Водопотребность растворной смеси определяется по распылу стандартного конуса на встряхивающем столике. Распыл конуса после 15 встряхиваний должен находиться в интервале 185 ± 3 мм. Количество воды для получения заданного распыла определяется с точностью до 1 г. Для приготовления раствора необходимо использовать стандартный песок по EN196–1. Сравнительная оценка водоудерживающей способности проб извести может быть получена и на любом другом песке, качество которого при проведении сравнительных испытаний не должно изменяться. Для составления растворной смеси необходимо знать насыпную плотность песка (P_n) и насыпную плотность извести (p_n). В соответствии с требованиями EN459–1 водоудерживающая способность строительной извести должна находиться в интервале значений от 65 до 85 %.

3.18. Определение качества заполнителей и наполнителей

Для оценки качества заполнителей каких-либо дополнительных методов к тем, которые входят в состав ГОСТ 8735 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», не требуется. Некоторое предварительное заключение о качестве песка может быть получено путем визуального осмотра. Нежелательными примесями в кварцевых песках являются слабые известняковые включения. Известняки часто могут быть загрязнены глинами или глинистыми сланцами. С точки зрения сокращения расхода связующих предпочтительнее применять заполнители с округлыми, а не остроугольными гранями. В то же время, дополнительное количество цемента, которое потребуется ввести в состав смеси с остроугольными частицами

заполнителя для обеспечения требуемой подвижности (пластичности) растворной смеси, даст раствор с более высокой прочностью за счет лучшего сцепления (в 1,5...2 раза) зерен заполнителя с цементным камнем. Так, например, еще во времена римской империи строители знали, что при использовании карьерного (остроугольного) песка наилучшим является соотношение известь-песок 1 : 3, а в случае речного или морского (окатанного) песка 1 : 2.

На природных песках в результате геологических процессов образуются поверхностные пленки, которые могут иметь различную прочность сцепления с поверхностью частиц. Эти пленки могут оказывать заметное влияние на прочность сцепления цементного камня с заполнителем. В этой связи следует обращать внимание на степень окрашенности песков, которая обусловлена отложением гидроксидов и оксидов железа. Гранулометрический состав заполнителя должен по возможности приближаться к «идеальной» кривой (см. разд. 3.1).

Полезной для изготовителя ССС характеристикой стабильности качества заполнителя, поставляемого определенным производителем, является определение коэффициента вариации. Для определения коэффициента вариации может быть выбрано одно или несколько наиболее важных свойств (содержание глинистых примесей, дисперсность и т.п.). Методика определения коэффициента вариации изложена в ГОСТ 8269.

Сравнительная оценка качества наполнителей, помимо сведений об их составе, основывается на данных гранулометрического анализа, по результатам которого строятся кривые, характеризующие фракционный состав наполнителей. Поскольку определение фракционного состава наполнителей способом просеивания на ситах затруднено, сведения о гранулометрическом составе наполнителей получают с помощью микроскопического анализа или используя гранулометры разного типа. Как правило, наполнители для ССС не должны содержать очень тонкие частицы $< 0,02$ мм. Возможным критерием для оценки качества наполнителя является средний размер зерна, определяемый на основе гранулометрической кривой. На рис. 3.21 в качестве примера приведена интегральная кривая распределения частиц по размерам (гранулометрическая кривая) наполнителя, и показано, как определяется средний размер зерна и коэффициент однородности. Методика определения среднего размера зерна приводится в ГОСТ 29234.3 «Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности». Определение коэффициента однородности позволяет оценить стабильность гранулометрического состава наполнителя (или заполнителя). Средний размер зерна (D_{cp}) соответствует размеру сторон ячеек сетки, через которую проходит 50 % частиц просеиваемого материала. При построении интегральной кривой распределения частиц по размерам по оси абсцисс откладывают в логарифмическом масштабе размер сторон ячеек сетки в свету (или размер частиц, если гранулометрическая кривая получена с помощью гранулометра, по данным микроскопического анализа и т.п.). Для определения коэффициента однородности (О) по кривой определяют процентное содержание частиц размером меньше $4/3 D_{cp}$ и $2/3 D_{cp}$. Коэффициент однородности равен разности этих значений (рис. 3.21).

Характеристика среднего размера частиц наполнителя должна указываться производителем. Частицы наполнителя должны заменять в составах растворных смесей часть вяжущего. С этой точки зрения наполнитель не должен содержать очень тонких частиц (менее среднего размера частиц цемента, который лежит в большинстве случаев в диапазоне 0,02...0,05 мм). Их введение хоть и приведет к повышению пластичности растворной смеси, но одновременно увеличит водопотребность, что, в свою очередь, снизит прочность и повысит усадочные деформации.

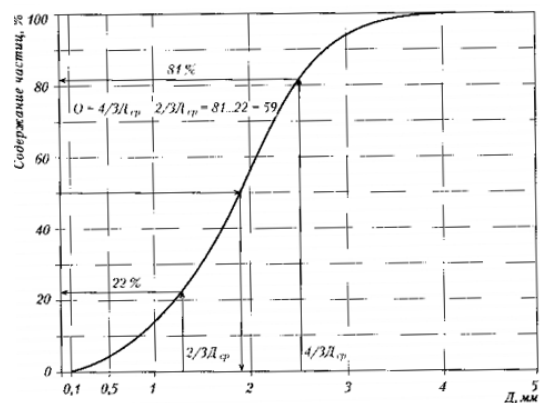


Рис. 3.21. Определение среднего размера зерна и коэффициента однородности заполнителя

4. ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ

4.1. Основные технические требования и классификация

Гравитационная бетонная плотина представляет собой массивные стены, устойчивость которых против сдвига под действием напора воды обеспечивается в основном сопротивлениями, развиваемыми по их контакту с основанием. Масса плотины, то есть объем уложенного материала играет главную роль в сопротивлении сдвигу. Гравитационные плотины строят обычно водосбросными, то есть водосливноыми с глубинными отверстиями. глухими выполняют лишь участки, сопрягающие водосбросную плотину с берегами. Полностью глухие бетонные плотины строят реже, так как они оказываются менее экономичными, чем земляные, каменные или каменно-земляные в тех же условиях. Кроме «классических» массивных гравитационных плотин в виде сплошной бетонной стены, существуют облегченные типы (рис. 4.1.): с расширенными швами, позволяющими снять некоторое давление на подошву основания; с продольными полостями: – с полостями, заполняемыми балластом; – заанкерные. Объемы бетона укладываемые в тело плотины значительны (табл. 4.1.) и поэтому на объектах строительства, как правило, строятся бетонные заводы и в некоторых случаях не одни.

Таблица 4.1

Объемы бетона, укладываемые в тело плотин

Плотины	Наибольшая высота h , м	Длина по гребню L , м	Ширина водослива по основанию, м	Объем бетона, м ³
Токтогульская	215	300	173	3200
Красноярская	128	1072	114,1	4895
Братская	123	1430	101	4395
Усть-Илимская	105	1562	81,5	4275
Бухтаминская	90	380	72,5	863
Усть-Калиногорская	65	390	41,4	364
Днепропетровская	62	760,5	40	732
Машакинская	58	345	48	229,4
Саяно-Шушинская	234			8000

Бетонами называют искусственный каменный материал, получаемый твердением рационально подобранной, тщательно отдозированной и перемешанной смеси вяжущего вещества, воды, крупного и мелкого заполнителей и добавок. Каждый из применяемых компонентов определяет свойства как бетонной смеси, так и собственно бетона. Для придания специальных свойств используется широкий комплекс добавок. На основании выбора исходных мате-

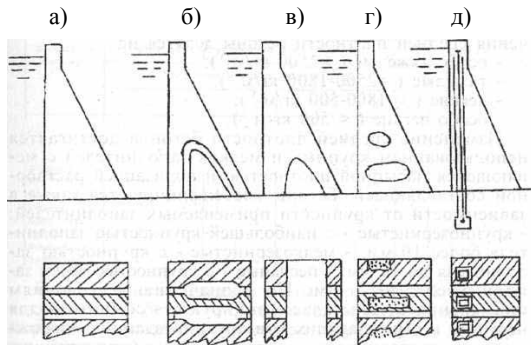


Рис. 4.1. Типы гравитационных бетонных плотин: а) массивная «классического типа»; б) расширенные у основания; в) с полостями с основания; г) с полостями, заполненными балластом; с) заанкерная в основании

риалов можно в широких пределах изменять строение бетонов, их структуру. Для бетонов характерна неоднородная (конгломератная) структура, так как свойства отдельных составляющих и их размеры крайне неоднородны. Выделяют следующие типы структур: макро-, определяемую крупным заполнителем и растворной частью; мезо-, сформированную песком и цементным тестом; микро – цементным камнем. Правильное формирование структур на всех уровнях и снижение количества дефектов позволяет повышать механические и эксплуатационные характеристики бетонов. В зависимости от значения средней плотности бетоны делятся на:

особо тяжелые ($> 2500 \text{ кг/м}^3$);
 тяжелые ($= 2500\text{--}1800 \text{ кг/м}^3$);
 легкие ($= 1800\text{--}500 \text{ кг/м}^3$);
 особо легкие ($< 500 \text{ кг/м}^3$).

Изменение средней плотности бетонов достигается использованием крупных и мелких заполнителей с меняющейся насыпной плотностью и поризацией растворной составляющей. Бетоны классифицируются также в зависимости от крупности применяемых заполнителей: крупнозернистые – с наибольшей крупностью заполнителя более 10 мм; – мелкозернистые – с крупностью заполнителя до 10 мм; – песчаные – с крупностью зерен заполнителя до 5 мм. По назначению и условиям применения бетоны классифицируют: – обычные – для несущих и ограждающих конструкций зданий: – дорожные: – гидротехнические; – специальные (жаростойкие, радиационно-защитные, теплоизоляционные, декоративные и др.). Каждый из видов бетонов обладает необходимыми физико-механическими, а также химическими свойствами, обеспечивающими гарантированную эксплуатацию материала в зависимости от вида выполняемого строительства. В качестве основных показателей бетона установлены классы и марки бетона, назначаемые на этапах проектирования конструкций и контролируемые при их изготовлении. Классы бетонов устанавливаются по прочности на сжатие и растяжение, марки – по морозостойкости, водонепроницаемости и плотности. Гидротехнические бетоны применяются для объектов, находящихся постоянно или периодически в водной среде, при этом подвергаясь действию морозных факторов. В соответствии с этим бетоны должны обеспечивать долговечность сооружения. Исходя из различных условий эксплуатации, к бетонам, находящимся в различных частях гидротехнического сооружения, предъявляется комплекс различных требований.

Таблица 4.2

Требования к гидротехническим бетонам по зонам

Требования к бетону	Массивные сооружения						Немассивные сооружения		
	Наружная зона			Внутренняя зона					
	Зона относительно уровня воды								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Морозостойкость	-	+	+	-	-	-	+	+	+
Водонепроницаемость	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Водостойкость	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Умеренное тепловыделение	+	+	+	+	+	-	-	-	-

Примечания. 1 – подводная зона; 2 – переменного уровня; 3 – надводная зона. Знак «+» соответствует наличию требований по данному показателю.

Большое число предъявляемых требований к гидротехническому бетону определяется значительными размерами объектов строительства, переменным действием или полным отсутствием водяного напора, климатическими факторами для конкретного места строительства. Бетоны гидротехнических объектов классифицируются на подводный, переменного уровня воды и надводный; наружной и внутренней зоны конструкции; массивной и немассивной ее частей. Распределение конструкции на установленные зоны, назначение их размеров и комплекса требований к соответствующим бетонам производится на этапе проектирования и проходит тщательную лабораторную проверку до момента начала строительства объекта применительно к конкретному географическому месту. Так как наиболее значительные объекты гидротехнического строительства располагаются в северной части страны, к бетонам предъявляются жесткие требования по морозостойкости. Регламентирование тепловыделений бетона объясняется возможностью создания значительных термических напряжений при его твердении, приводящих к появлению микро- и макротрещин. Наиболее сложные условия эксплуатации приходятся на бетоны, находящиеся в зонах переменного

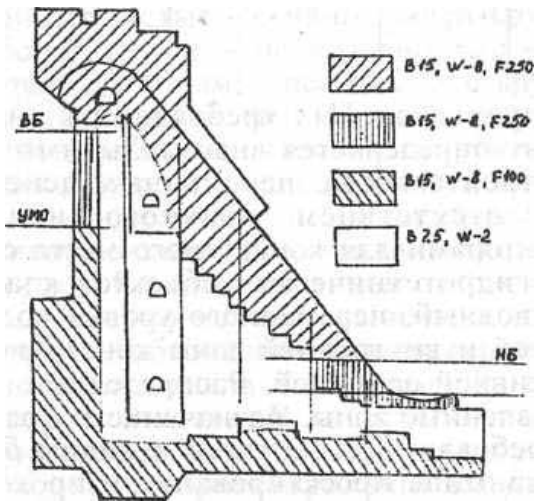


Рис. 4.2. Поперечный разрез водосливной плотины Саяно-Шушенской ГЭС с распределением бетона по маркам

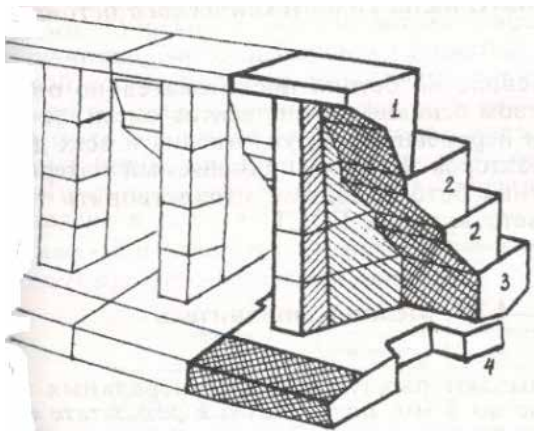


Рис. 4.3. Детали набережной стенки из сборных железобетонных блоков:

1 — верхний блок; 2 — рядовой стандартный блок; 3 — нижний блок; 4 — плита основания

н.э.) и монолитного свода пирамиды Нима задолго до нашей эры. Египтяне использовали в качестве вяжущего вещества гипс и известь. Четверть века назад мир облетело предположение швейцарского профессора-химика Джозефа Давидовица об искусственном изготовлении блоков из геополимерного бетона, составляющих пирамиду Хеопса. Обследуя известняковые блоки, профессор в каменной массе одного из них нашел человеческий волос, который мог оказаться там лишь в одном случае: упал с головы рабочего при замешивании раствора. Результатом дальнейших поисков ученого стала надпись на стеле периода III династии. Расшифрованные иероглифы содержали рецепт приготовления древнего бетона. Независимое исследование выявило, что основание Великих пирамид сложено из природных известняков, а несколько верхних рядов выполнены из бетона. Состав бетонной смеси включает пальмовую золу, песчаниковую крошку и разновидность соды, полученную из нильской воды.

В Индии уже в наше время в храмах и дворцах знати были обнаружены хорошо сохранившиеся бетонные «набивные» полы (IV–V вв. до н.э.). Одними из первых начали применять бетон древние жители Китая. Великая Китайская стена, строительство которой было начато в III веке до н.э., сооружена частично из бетона. Приготовление бетона и формование из него стен можно описать так: одна часть известкового теста тщательно перемешивалась с двумя

уровня, а также в наружной части сооружений. Зона переменного уровня определяется на этапе проектирования. Использование бетонов на примере строительства Саяно-Шушенской ГЭС показано на рис. 4.2., которая является рекордной по размерам и объемам использованного бетона. Объем бетона в теле основной плотины составил 9 млн м³, высота плотины 234 м, объем водохранилища – 31,3 км³. В качестве примера, бетонная гравитационная плотина Братской ГЭС имеет высоту 123 м и объем водохранилища – 169,4 км³, Камненабросная плотина Ассуанской ГРЭС на р. Нил в Египте высотой 110 м имеет водохранилище в 164 км³ (построена при технической и экономической помощи СССР в 1970 г.).

4.2. Кто изобрел бетон. История строительства

Как большинство строительных материалов бетон прошел длинный путь развития. При раскопках на берегу Дуная археологи обнаружили остатки жилья 5000-летней давности, где полы толщиной 25 см представляли собой доисторическую бетонную заливку: в качестве вяжущего вещества выступала красная глина, армирующим элементом служил мелкий речной гравий.

Отдельные примеры связывания мелких камней растворами или использование раствора с крупным заполнителем были известны в глубокой древности у египтян, вавилонян, финикийцев и карфагенян. Наиболее раннее применение бетона в Египте, обнаруженное в гробнице Тебесе (Теве), датируется 1950 г. до н.э. Бетон был применен при строительстве галерей египетского лабиринта (3600 лет до

частями песка и гравия, затем такая сухая бетонная смесь с небольшим содержанием воды укладывалась слоями толщиной около 12 см между деревянными щитами опалубки и усиленно уплотнялась деревянными трамбовками. Следующий бетонный слой укладывался на увлажненную поверхность предшествующего. Процесс повторялся до полного возведения стены.

Француз Шарру рассказал о применении бетона кельтами, населявшими часть территории современной Европы. Он излагает мнение профессионального химика, который в течение многих лет исследовал тумулы – каменные монументы кельтов в Галлии и проводил анализы почвы, которые привели его к однозначному выводу: сооружения возводились с применением бетона (или строительного раствора).

Искусство производства бетона постепенно распространялось в Восточном Средиземноморье и примерно к 500 г. до н.э. достигло Древней Греции, где для покрытия стен, в том числе из необожженного кирпича, использовался мелкозернистый известковый бетон. Так были отделаны дворцы царей Креза (560–546 гг. до н.э.) и Агталы. Впоследствии бетон стал применяться в виде бутовой кладки. Пространство между двумя рядами каменной стены заполнялось крупными камнями, а затем заливалось известковым раствором. Витрувий – римский архитектор и инженер II половины 1 в. до н.э. – в своем архитектурном трактате довольно подробно описал несколько видов такой кладки. Скорее всего, что знаменитые римские бетонные стены развились как раз из греческой бутовой кладки.

Бетон мог получить широкое распространение лишь в таком сильном и огромном государстве, каким был Древний Рим с его большими объемами строительных работ, включая сооружение многотысячных амфитеатров, стадионов, знаменитых римских дорог, протянувшихся на тысячу километров по всей стране и за ее пределами. Появление римского бетона отражало растущие потребности и технические возможности античного общества. Римляне не были изобретателями бетона, но именно в Древнем Риме бетон превратился в один из основных конструктивных строительных материалов благодаря своим свойствам: прочности, водонепроницаемости, экономичности. Применение бетона на территории Древнего Рима началось примерно

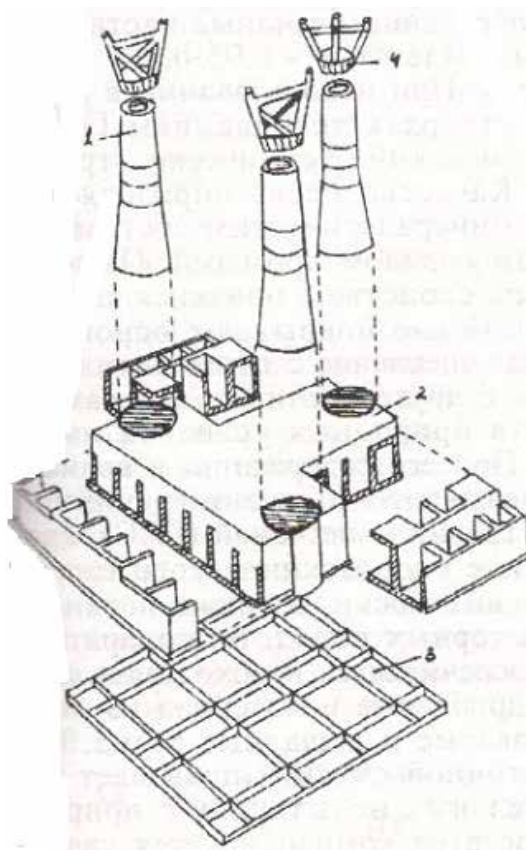


Рис. 4.4. Железобетонная плавучая платформа для морской добычи газа (бетон марки 500):

1 – опорные башни из преднапряженных монолитных оболочек; 2 – железобетонные кессонные блоки; 3 – железобетонная плита Оп ища; 4 – металлические детали надводной части конструкции





с конца IV в. до н.э. и продолжалось около 700 лет. Римляне материал, подобный бетону, называли по-разному. Так, литую кладку с каменным заполнителем они именовали греческим словом «эмплектон» (emplekton). Встречается также слово «рудус» (rudus). Однако чаще всего при обозначении раствора для возведения стен, сводов и фундаментов в римском лексиконе употреблялось словосочетание «опус цементум» (opus caementitium), которым и стали называть римский бетон. В конструктивных

элементах Колизея, например, встречается три вида бетона: для фундамента, приготовляемого на щебне из высокопрочного сорта лавы, для стен на щебне из травертина, туфа и кирпичного боя и особо легкий из пемзы, предназначенный для сводов, которые не несут большой нагрузки. В 90-х годах I в. н. э. был открыт Колизей, построены термы, триумфальная арка в честь побед Тита, где мощный пятиметровый фундамент был выполнен из трамбованного бетона. В 123 г. заканчивается в Риме строительство Пантеона, размер бетонного купола которого диаметром 43 м до XIX в. оставался рекордным для данного типа бетонных конструкций. Особое место бетону отводилось при возведении общественных и жилых зданий, особенно при постройке инсул – многоэтажных домов.

После падения Римской Империи рецепт изготовления бетона был забыт на тысячу лет. Современный бетон на цементном вяжущем веществе известен с 1844 г. Но венцом современного бетона стал железобетон. Интересна история его возникновения. В конце XIX века французский садовод Джозеф Монье озабочился прочностью бетонных горшков, которые при разрастании корневой системы растений разваливались. Монье стал укреплять бетонные горшки железными вкладышами, увеличивая тем самым прочность на растяжение, и в 1867 г. запатентовал переносные садовые кадки из железа и цементного раствора. Это принесло Джозефу Монье не только материальную выгоду, но и славу изобретателя железобетона и ЖБИ.

В практическом освоении и научном познании бетона в конце XIX – начале XX в. одно из ведущих мест занимает Россия, где бетон широко используется при строительстве портов (Одесса, 1870-е гг.), канализационных коллекторов (Петербург, 1912), фортификационных сооружений (Севастополь, 1885; Кронштадт, 1900). О крупных масштабах применения бетона в России свидетельствует тот факт, что к 1900 г. здесь работало уже 66 бетонных заводов и полигонов, в 1913 г. в строительстве было использовано около 3,5 млн м³ бетона. В Советском Союзе технология бетона получила широкое развитие со времени первых крупных гидротехнических строителств – Волховстроя (1924 г.) и Днепростроя (1930 г.). Советские ученые разработали методы зимнего бетонирования и тем самым обеспечили круглогодичное возведения бетонных и железобетонных конструкций, создали ряд новых видов бетона и вяжущих веществ, разработали способы повышения долговечности бетона, основы технологии сборного железобетона.

Одна из актуальнейших проблем современного бетоноведения – применение и совершенствование нового поколения бетонов, получивших в мировом научном сообществе название «High Performance Concrete». Появление таких бетонов открыло новую эру в строительстве. Их уникальные свойства: высокая прочность и коррозионная стойкость, водонепроницаемость и морозостойкость, регулируемая деформативность – позволили реализовать такие строительные проекты, как: мост через пролив Акаси в Японии с центральным пролетом в 1990 м, туннель под Ла-Маншем, 125-этажный небоскреб высотой 610 м в Чикаго и т.п. Высококачественные бетоны обеспечивают высокие гарантированные параметры эксплуатационной надежности зданий и сооружений в условиях сложных воздействий окружающей среды и нагрузок, значительно сокращают сроки строительства и уменьшают инвестиционные риски.

Сегодняшняя жизнь без бетона немыслима. Этот материал с тысячелетней историей останется востребованным во все времена и будет продолжать свое развитие в зависимости от возложенных на него задач.

4.3. Основные сведения о бетоне

Бетоном называют искусственный камень, получаемый в результате твердения рационально подобранной смеси, которая состоит из вяжущего вещества, воды и заполнителей (песка и щебня или гравия). Смесь этих материалов до затвердевания называют бетонной смесью. Зерна песка и щебня составляют каменную основу бетона. Цементное тесто, образуемое после затворения бетонной смеси водой, обволакивает зерна песка и щебня, заполняет промежутки между ними и играет вначале роль смазки заполнителей, придающей подвижность (текучесть) бетонной смеси, а впоследствии, затвердевая, связывает зерна заполнителей, образуя искусственный камень – бетон. Бетон в сочетании со стальной арматурой называют железобетоном. Бетон как строительный материал применяли еще в глубокой древности. С течением времени использование его в строительстве почти прекратилось, и только с XIX столетия после изобретения новых гидравлических вяжущих, в первую очередь портландцемента, бетон снова стали широко применять для строительства различных инженерных сооружений. Начиная 60-х годов XIX в., после усовершенствования технологии и повышения марочной прочности цемента, он становится основным вяжущим для бетона и железобетона. Русские ученые уже с конца XIX в. уделяли большое внимание созданию плотного бетона и правильному расчету его состава.

Крупный вклад в науку о бетоне внесли военные инженеры, были изложены результаты исследований зависимости прочности бетона от содержания воды, уплотнения бетонной смеси, крупности песка и щебня или гравия. Заслугой советских ученых является создание способов производства зимних бетонных работ и широкое внедрение их в практику. Крупные успехи имеются также в создании легкого, кислотоупорного и жароупорного бетонов. Технология легких бетонов, разработанная Н. А. Поповым, в настоящее время получила широкое развитие. Все более широко применяют пенобетон и газобетон, обладающие малыми объемной массой и теплопроводностью.

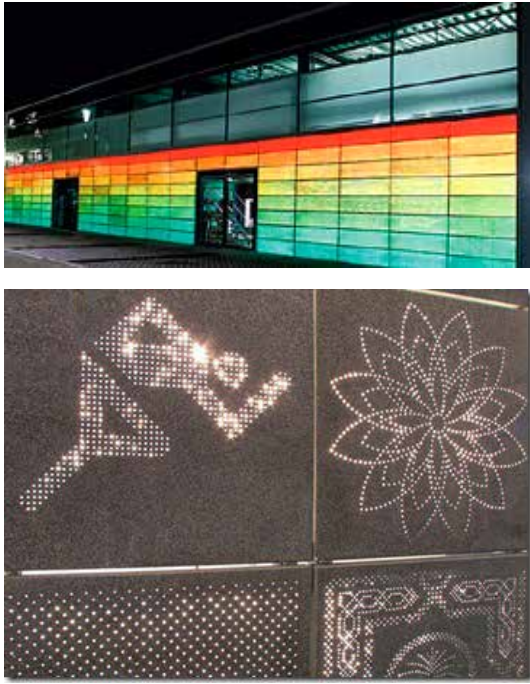
Получать бетонную смесь и бетон высокого качества можно только при глубоком знании технологии, умении выбирать материалы необходимого качества и устанавливать их оптимальное соотношение, изыскивать режимы приготовления бетонной смеси, методы ее укладки, уплотнения и условий твердения, обеспечивающие получение бетонных конструкций высоких прочности и долговечности.

4.4. Прозрачный бетон – материал будущего

Казалось бы, строители давно изучили все химические и физические свойства данного материала. Но то что сквозь прозрачную несокрушимую массу можно разглядеть силуэты, черты и цвета предметов, которые находятся за ним, об этом мало кто подозревал. При этом прозрачный материал остается шумо- теплоизолирующим, прочным и водостойким. Таким образом, это такой вид композиционного бетона, который пропускает свет сквозь себя, при этом оставаясь по свойствам обыкновенным бетоном.

Прозрачный бетон обозначается еще одним термином – литокон. Есть и другое название – люцем. Создатель прозрачного бетона – Арон Лошонци. Именно ему пришла в голову





необычная идея совместить бетон с оптическим волокном, которое применяется в телекоммуникациях. Первый образец бетона, который сам изобретатель называет полупрозрачным, был сделан в 2001 году.

Ныне этот венгерский архитектор открыл свою компанию и теперь занимается производством прозрачного бетона в огромных объемах. В новой версии люцема архитектор применил пластик, что позволило несколько удешевить материал и сделать его существенно привлекательнее. Мечтой архитектора является увидеть когда-нибудь городские кварталы, возведенные из литракона.

Прозрачность бетону обеспечивают стеклянные волокна, входящие в состав этого материала. Из них складывается матрица, сквозь которую становится возможным рассмотреть силуэты предметов. Исследователи выяснили, что свет через прозрачный бетон заметен на расстоянии более 20 метров.

Прозрачный бетон, как и фасад из водорослей, незамедлительно нашел свое применение и стал распространенным явлением в различных странах. В США, как правило, его применяют для производства ограждений многих правительственных зданий. В Швеции и Японии из такого материала сооружены весьма монолитные строения. Люцем стал главным материалом при постройке центрального представительства BMW – знаменитого автомобильного концерна. Помимо этого, из прозрачного бетона стали производить и малые предметы. Сегодня достаточно популярны светильники, сделанные из литракона. Подобный аксессуар весит немного – всего 10 килограмм, но обходится в значительную сумму – порядка 600 евро за каждый светильник.

Сегодня появляется все больше компаний, которые выпускают прозрачные бетонные элементы. Такой бетон представлен и на отечественном рынке. В частности, можно купить блоки и панели разной конфигурации и размера.

Литракон представляет собой сочетание стекловолокна и мелкозернистого бетона. Из-за наличия в его составе огромного числа оптических волокон, он становится полупрозрачным и великолепно играет тенью и светом. Бетонные блоки, через которые просвечиваются знакомые очертания различных предметов, находящихся по ту сторону, кажутся весьма невесомыми.

Технологии производства прозрачного бетона производители способны изменять в соответствии с потребностями заказчика. Например, «точки» стекловолокна в таком бетоне могут быть попросту разбросаны по поверхности плиты или расположены в заданном порядке, а также представлять собой разнообразные контуры изображений. Это, бесспорно, является, значительным преимуществом нового декоративного материала.

Эта технология позволяет бетонной конструкции светиться в полумраке. В сравнении со стеклом либо внешним светильником, который подсвечивает конструкцию из обыкновенного бетона, прозрачный аналог обладает еще одним очевидным преимуществом – противобандностью. Если светильник, подсвечивающий обрамление витрины должен быть снаружи и принципиально не может быть защищен от хулиганских посягательств и действий, то светильник, который находящийся за прозрачной бетонной стеной – совершенно иное дело. Чтобы сломать его, необходимо буквально, пройти сквозь прозрачную стену, что очень затруднительно.

Несомненно, что воздушность и легкость внешнего вида сияющего бетона противопоставляется напрямую тяжелому типу бетона, особенно в сумерках. Световое традиционное оформ-

ление подобных массивных форм часто не делает их легче, а наоборот подчеркивает их доминирование и тяжесть, что вполне хорошо для тоталитарного стиля, но неприемлемо в городской современной среде. А вот прозрачный и сверкающий изнутри бетон, смотрится совершенно иначе. Поэтому фасадные бетонные конструкции могут стать очень популярны, так как технически в применении таких блоков не видно каких-либо существенных проблем.

Поэтому вполне стоит ожидать, что подобная технология будет широко использоваться для организации светового внешнего декора на различных городских улицах. Остановочные павильоны, тумбы всякого назначения, основания скамеек, – все это теперь может выглядеть совсем иначе, чем ныне. Особенно перспективным смотрится применение прозрачного бетона для устройства фасадов малых городских строений, а также павильонов. К примеру, торгового назначения. Они должны быть заманчивыми в любое время.

Благодаря тому, что стекловидные оптические волокна обладают небольшим размером, внешняя поверхность и внутренняя структура этого материала однородны. Причем, уникальные свойства прозрачного бетона сохраняются и при солидной толщине блоков, так как стекловолокно, как уже говорилось выше, способно проводить свет на расстояние двадцати метров. Достаточно подсветить бетонную конструкцию с обратной стороны, чтобы свет появился также на его лицевой стороне. Таким образом, всего несколько процентов подобного волокна позволяют не только созерцать наличие света, но и передать цвета, а также контуры фигур, которые находятся внутри помещения.

Как уже отмечалось, представленный строительный материал никогда не ассоциировался у людей, как такой, с помощью которого можно было бы добиться архитектурной красоты, изысканности и индивидуальности. Наоборот, он выглядит бездушной и серой, каменеющей массой. Кто бы мог представить, что данный стереотип будет разрушен. Теперь прозрачный бетон начинает уверенно завоевывать рынки и превращается в один из наиболее популярных материалов в строительстве. Квадратный метр прозрачного бетона обходится приблизительно в 4000 евро. Поэтому такой бетон еще медлительно продвигается на рынке. Тем не менее прозрачный бетон – это, несомненно, материал будущего. У него есть все возможности, чтобы приобрести лидирующие позиции среди разных декоративных стройматериалов.



4.5. Бетоны и растворы. Определение и общая классификация бетонов и растворов

Трудно сказать, когда впервые в строительной практике появился бетон, так как начало его использования человеком уходит вглубь веков. Наиболее раннее применение бетона, обнаруженное археологами, можно отнести к 5600 г. до н.э. Этот бетон был найден в одной из хижин древнего поселения каменного века на берегу Дуная в Югославии. Из него был сделан пол толщиной 25 см. В состав того бетона входили гравий и известь красноватого цвета. К этому же периоду относится материал, из которого выполнены конструкции «египетского лабиринта» и который также был приготовлен строителями древности на известковом вяжущем веществе. Однако бетон тех времен мало походил на современный. Поэтому материал, подобный бетону, называли по-разному: «эмплектон», «радус», «опус цементум»,

«псевдо- или квази- (якобы) бетон» и др. В теперешнем виде бетон начали применять лишь в начале XIX в., когда был изобретен портландцемент. И все же наибольшее применение этот материал получил лишь в XX ст., преобразившем мир.

Бетон создан специально для нужд строительства и производится только для строительных целей. И состав его тоже исключительно прост: цемент, вода, мелкий и крупный заполнитель типа песка, гравия или щебня. Вместо цемента может быть использовано другое вяжущее. Вода вступает в химическую реакцию с цементом, в результате которой вязкопластичная вначале масса постепенно превращается в прочный цементный камень. Он и связывает в единую систему (конгломерат) заполнители. При необходимости в состав бетона вводят добавки различного назначения.

Бетоном называют искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердевания правильно подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси вяжущего вещества, воды, заполнителей и в необходимых случаях – специальных добавок. Смесь из указанных выше компонентов до начала ее затвердевания называют бетонной смесью.

Строительным раствором называют искусственный каменный материал, получаемый в результате твердения правильно подобранной смеси, состоящей из вяжущего, мелкого заполнителя, воды и добавок. До начала затвердевания ее называют растворной смесью.

Классифицируют бетоны по следующим основным признакам: назначению, средней плотности, виду вяжущего, виду заполнителей, структуре и условиям твердения.

По основному назначению различают следующие бетоны: конструкционные и специальные (жаростойкие, коррозионно-стойкие, декоративные, теплоизоляционные, радиационно-защитные, бетонополимеры, полимербетоны и др.). Конструкционные бетоны – это бетоны несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, определяющими требованиями к качеству которых являются требования по физико-механическим характеристикам. Конструкционные бетоны делят на обычные, гидротехнические, дорожные и др.

Обычным называют бетон, к которому не предъявляются особые требования.

К гидротехническим относят бетоны, применяемые для возведения гидротехнических сооружений (плотин, водорегулирующих, водозаборных и других сооружений).

Дорожным называют бетон, применяемый в покрытиях дорог, аэродромов и других подобных сооружений.

Жаростойкие бетоны применяют для изготовления конструкций, которые в условиях эксплуатации подвергаются постоянному или периодическому воздействию температур от 200 до 1800 °С.

Конструкционно-теплоизоляционные бетоны предназначены для железобетонных конструкций, к которым предъявляются требования как по несущей способности, так и по теплоизоляционным свойствам.

Коррозионностойкими называют бетоны, способные в условиях эксплуатации противостоять действию агрессивных сред.

В зависимости от средней плотности различают особо тяжелые, тяжелые, легкие и особо легкие бетоны.

Особо тяжелые бетоны со средней плотностью более 2500 кг/м³ изготавливают на особо тяжелых заполнителях (магнетит, лимонит, барит, чугуновая дробь, обрезки стали). Эти бетоны применяют для изготовления специальных конструкций, например при сооружении зданий атомных электростанций для защиты от радиоактивного излучения.

Тяжелые бетоны со средней плотностью 2000...2500 кг/м³ изготавливают на плотном песке и крупном заполнителе из плотных горных пород и используют во всех несущих конструкциях.

Легкие бетоны со средней плотностью 500...2000 кг/м³ выпускают на пористом крупном заполнителе и пористом или плотном мелком заполнителе. Их используют в основном для производства ограждающих или несущих конструкций.

Особо легкие бетоны (ячеистые) со средней плотностью менее 500 кг/м^3 изготавливают на основе вяжущего вещества, кремнеземистого компонента и порообразователя. Они применяются в качестве теплоизоляционного материала в виде плит, скорлуп, стеновых изделий (мелких блоков и панелей).

По виду вяжущего бетоны подразделяют следующим образом: бетоны на цементных вяжущих; бетоны на известковых вяжущих; бетоны на гипсовых вяжущих; бетоны на шлаковых и бетоны на специальных вяжущих.

По виду заполнителей различают: бетоны на плотных заполнителях; бетоны на пористых заполнителях; бетоны на специальных заполнителях.

По крупности зерен заполнителей различают бетоны мелкозернистые и крупнозернистые.

Мелкозернистым считается бетон, в котором размеры зерен крупного заполнителя менее 10 мм.

В зависимости от характера структуры различают следующие виды бетонов:

- бетоны плотной (слитной) структуры, в которых пространство между зернами заполнителей полностью занято затвердевшим вяжущим веществом;
- крупнопористые бетоны (беспесчаные или малопесчаные), в которых значительная часть объема межзерновых пустот остается не занятой мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим веществом;
- поризованные бетоны, в которых пространство между зернами заполнителей занято вяжущим веществом, поризованным пенообразующими или газообразующими добавками;
- ячеистые бетоны – бетоны с искусственно созданными ячейками-порами, состоящие из смеси вяжущего вещества, тонкодисперсного кремнеземистого компонента и порообразующей добавки.

По условиям твердения бетоны подразделяются на:

- бетоны естественного твердения, твердеющие при температуре $15.. 20^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении;
- бетоны, подвергнутые с целью ускорения твердения тепловой обработке ($70.. 90^\circ\text{C}$) при атмосферном давлении;
- бетоны, твердеющие в автоклавах при температуре $175...200^\circ\text{C}$ и давлении пара $0,9... 1,6 \text{ МПа}$.

Строительные растворы классифицируют по плотности, виду вяжущего, составу и назначению.

По средней плотности различают растворы тяжелые плотностью более 1500 кг/м^3 и легкие плотностью менее 1500 кг/м^3 .

По виду вяжущего растворы бывают известковые, гипсовые, цементные и на основе смешанных вяжущих. В зависимости от свойств вяжущего растворы подразделяют на воздушные, твердеющие в воздушно-сухих условиях (например, известковые, гипсовые), и гидравлические, начинающие твердеть на воздухе и продолжающие твердеть в воде или во влажных условиях.

По степени готовности растворы делят на: сухие смеси и растворные смеси, готовые к применению.

По составу растворы делят на простые и сложные (смешанные). Растворы, приготовленные на одном вяжущем, заполнителе и воде, называют простыми. Составы простых растворов обозначают двумя числами. Например, известковый раствор состава 1 : 4 означает, что в растворе на одну часть извести приходится четыре части заполнителя (песка). Растворы, приготовленные на нескольких вяжущих, заполнителе и воде, называют сложными или смешанными. Составы сложных растворов обозначают тремя числами. Например, состав известково-цементного раствора 1 : 1 : 9 обозначает, что на одну часть извести в растворе приходится одна часть цемента и девять частей заполнителя.

По назначению строительные растворы различают: кладочные – для каменной кладки фундаментов, стен, столбов, сводов и др.; отделочные – для оштукатуривания стен, потолков, защитно-декоративные – для отделки наружных поверхностей зданий и сооружений и декоративные – для отделки внутри помещений; монтажные – для заполнения и заделки швов между крупными элементами при монтаже зданий и сооружений из готовых сборных конструкций и деталей; специальные – водонепроницаемые, кислотостойкие, жаростойкие, акустические, теплоизоляционные, инъекционные, рентгенозащитные и перекачиваемые по трубопроводам.

4.5.1. Бетон лёгкий

Бетон лёгкий – бетон с объемным весом менее 1800 кг/м^3 . В связи с появлением все более легких пористых заполнителей и усовершенствованием технологии нижняя граница объемного веса бетона легкого установлена 500 кг/м^3 (ячеистый бетон, крупнопористый керамзитобетон, перлитобетон и т.п.). В более узком смысле бетоном легким называют бетон, состоящий из вяжущего, фракционированных пористых заполнителей в воды. В состав бетона легкого часто вводят добавки для улучшения удобоукладываемости, ускорения твердения, уменьшения расхода цемента и объемного веса бетона, для улучшения др. свойств (прочности, морозостойкости и т.п.). Бетон легкий изготавливают с применением цементов или др. вяжущих (гипса известково-песчаного и др. вяжущих, требующих автоклавного твердения, и т.п.). Бетон легкий на цементе получает наименование в соответствии с видом примененного пористого заполнителя (например, шлакобетон, пемзобетон, керамзитобетон и пр.), а изготовленный на др. вяжущих – в соответствии с видом вяжущего и заполнителем (например, гипсошлакобетон, известково-песчаный автоклавный шлакобетон и т.д.).

Заполнителями для бетона легкого служат природные или искусственные виды пористого щебня (или гравия) и пористого песка. Бетоны легкие делят по назначению на 3 основные группы; теплоизоляционные (в частности, для многослойных ограждающих конструкций) – с объемным весом менее 700 кг/м^3 , марки таких бетонов по прочности на сжатие 5, 10, 15 кг/см^2 ; конструктивно-теплоизоляционные (для однослойных ограждающих конструкций) – с объемным весом от 700 до 1600 кг/м^3 при марках по прочности от 35 до 100 кг/см^2 ; конструктивные (для различных несущих конструкций и инженерных сооружений – элементов мостов, плотин и т.п.). Степень морозостойкости и водостойкости бетона легкого зависит от вида заполнителя, а также от вида и расхода вяжущего. Бетоны легкие на природных и искусственных пористых заполнителях, не содержащих вредных примесей и распадающихся частиц (аглопорит, керамзит и т.п.), и на антрацитовых топливных шлаках, очищенных от несгоревшего топлива, избытка воды и др. вредных примесей, обладает, при правильно выбранном составе, высокой морозостойкостью, выдерживая 50–100 и более стандартных циклов испытаний. К бетону легкому предъявляют следующие основные требования. Бетонная смесь должна иметь виброукладываемость, соответствующую интенсивности применяемого виброуплотнения, и не должна расслаиваться. Затвердевший бетон легкий должен обладать заданными объемным весом и прочностью, а также необходимой морозостойкостью (при использовании для наружных конструкций). Удобоукладываемость и прочность бетона легкого зависят от тех же факторов, что и у обычных тяжелых бетонов, однако в данном случае имеют значение особые свойства пористых заполнителей (сильно развитая их поверхность, способность поглощать воду, пониженная прочность). Пониженный вес и теплопроводность позволяют эффективно выполнять из бетона легкого элементы наружных ограждений зданий (стены, покрытия и т.п.). Бетоны легкие на цементах применяют для несущих бетонных и железобетонных конструкций, гипсошлакобетоны – преимущественно для перегородок и т.п. конструкций, защищенных от увлажнения.

Применение бетона легкого значительно расширяется, т.к. использование их эффективно не только для наружных ограждений отапливаемых зданий, но и во всех случаях, когда необходимо уменьшить вес конструкций. Особое значение бетон легкий имеет для индустриального строительства зданий из крупных панелей и блоков, использование его существенно снижает трудоемкость, вес и стоимость сооружений.

4.5.1.1. Конструкционные легкие бетоны в современном строительстве

Анализ мирового опыта решения актуальных проблем энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и инженерных сооружений, повышения их надежности, долговечности и безопасности в эксплуатации (в том числе пожарной) показывает, что выходом является комплексное использование легких бетонов нового поколения (от особо легких теплоизоляционных до конструкционных высокопрочных). Под понятием «комплексное использование» имеется в виду не только традиционное использование легких бетонов в ограждающих конструкциях, но и в несущих, т.е. полное их использование в конструктивной системе зданий и инженерных сооружений в целом. Под понятием «легкие бетоны нового поколения» имеется ввиду разработанная за последние 10 лет НИИЖБом с участием НИИСФа, МНИИТЭПа и др. организаций номенклатура легких бетонов со структурой, модифицированной различными химическими и минеральными добавками, на эффективных пористых заполнителях новых видов или традиционных видов, но с улучшенными строительно-техническими свойствами. Такая модификация структуры легких бетонов позволила существенно повысить их качественный уровень и, соответственно, повысить их конкурентную способность в сравнении с другими видами современных строительных материалов. В частности, модификация структуры конструкционных легких бетонов значительно расширила возможную область их применения за счет следующих основных их преимуществ в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами на природных плотных заполнителях, установленных в исследованиях НИИЖБа последних лет:

- меньшая на 20–50 % плотность;
- более высокий (на 0, 1–0, 2 R_{np}) уровень нижней границы области мик-ротрещинообразования бетона R[^]-, соответственно более высокий предел выносливости бетона при действии многократно повторяющихся статических нагрузок сжатия;
- более высокий (на 0, 05–0, 15 R_{np}) уровень верхней границы области мик-ротрещинообразования бетона R+v;
- соответственно более высокий предел длительной прочности бетона;
- выше на 1–5 марок морозостойкость бетона и на 1–3 марки водонепроницаемость;
- ниже в 1, 5–2, 0 раза коэффициент теплопроводности бетона;
- выше на 300–500 гр. С температура службы бетона, выше огнестойкость.

В бывшем СССР была создана производственная база, обеспечивающая почти в полном объеме строительство зданий и инженерных сооружений с комплексным применением легких бетонов (в основном керамзитобетона и шлакопемзобетона). Эта база, к сожалению, существенно сокращенная в годы перестройки, нуждается в настоящее время в ускоренном развитии, в модернизации технологических линий и оборудования. Об актуальности этой задачи как одной из важнейших в развитии строительного комплекса свидетельствует явная перспективность конструкционных легких бетонов для применения в современных конструктивных системах зданий и инженерных сооружений. К этому выводу приводит нижеизлагаемый краткий анализ применения таких бетонов в отечественной и зарубежной практике строительства.

4.5.1.2. Сборный конструкционный лёгкий бетон, в том числе перенапряжённый

Весьма эффективно применение легкого бетона в сборных большепролетных несущих конструкциях зданий различного назначения, где существенную долю от расчетной нагрузки имеет их собственная масса. Об этом свидетельствует опыт применения в России в 70–80-х гг. следующих видов конструкций промышленных и общественных зданий:

- предварительно напряженные тонкостенные ребристые плиты «на пролет» (3 x 18 м), панели-оболочки типа «КЖС» пролетом 18, 24 и 36 м из шлакопемзобетона класса по прочности на сжатие В30 для строительства промзданий в Липецке, Череповце;

- «динакоры» – тонкостенные элементы покрытий коробчатого сечения пролетом до 40 м из керамзитобетона класса В30 для общественных зданий (Москва).

В информационных материалах СЕВ/FIB (в дальнейшем – fib) 2–3 имеется информация об эффективном использовании легких бетонов в достаточно больших объемах в США, странах континентальной Европы, Австралии и др. в сборных конструкциях следующих видов: конструкции вертикальных рам, преднапряженные стропильные фермы, консольные элементы кровли пролетом до 30 м, большепролетные балки, перекрытия, плиты покрытий, крупноразмерные оболочки покрытий различной конфигурации, пролетные строения мостов.

В международном стандарте на конструкционный легкий бетон, разработанном целевой группой «Task Group 8.1 fib» с участием автора настоящей статьи, нормируются прочностные и деформативные свойства такого бетона класса по прочности на сжатие до LC88, что соответствует марке бетона M1000 по ГОСТу 25820.

В многочисленных как отечественных, так и зарубежных работах, посвященных анализу применения легкого бетона (4) в сборных крупноразмерных армированных конструкциях, отмечаются как достоинство возможность уменьшения площади сечения и расхода арматуры в сравнении с аналогичными конструкциями из тяжелых бетонов. При определении эффективности от применения легкого бетона в сборных преднапряженных конструкциях значительное внимание уделяется снижению транспортных расходов, которые здесь являются важным фактором при принятии решения об использовании того или иного вида бетона. Следует в завершении отметить такие уникальные примеры применения керамзитобетона в сборных конструкциях, как: – забивные сваи, высоконапорные трубы больших диаметров в России, цилиндрические трубы малых диаметров в транспортном строительстве в США; – сборные элементы морских гидротехнических сооружений, в частности сваи-оболочки причальных сооружений и платформы для добычи нефти в северных приливных морях (Канада, Норвегия).

4.5.1.3. Монолитный конструкционный лёгкий бетон

Строительство монолитных зданий из легких бетонов высотой преимущественно до 8 этажей получило развитие в СССР с 1927 г. К 80-м гг. в России из монолитного легкого бетона выполнялись и отдельные конструкции, и полностью конструктивные системы зданий и сооружений практически во всех видах строительства. Выполнялись в монолитном варианте различные типы перекрытий, покрытий, рамные конструкции, колонны зданий, лифтовые шахты и даже такие конструкции, как цилиндрические оболочки, диафрагмы и арки.

В гражданском строительстве бывшего СССР из монолитного легкого бетона в скользящей или объемно-переставной опалубках возведены 9–16-этажные дома в более чем 30 крупных городах России, Украины, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Туркмении и Латвии; методом подъема монолитных перекрытий, выполненных из легкого бетона, возведены здания в Армении, Узбекистане и Таджикистане. Использовался в основном керамзитобетон, шлакопемзобетон, бетон на природных пористых заполнителях классов по прочности на сжатие В3, 5-В25 (марок М50-М300). Монолитный легкий бетон наиболее широко приме-

нялся и применяется в настоящее время в США, Австралии, Японии, Германии, Австрии, Венгрии, Румынии и др. европейских странах. Особенно эффективно монолитный легкий бетон используется при возведении высотных зданий (например, «Australian Square» – в Сиднее, «Picasso Tower» в Мадриде, «Like Point Tower» – в Чикаго, административные здания высотой 218, 222 и 310 м. – в г. Хьюстоне, правительственное здание «Tokyo City Hall» в Японии (фото 1). Первый известный авторам крупный нормативный документ – «Указания по применению бетона в высотном строительстве» издан еще в 1963 г. Американским институтом бетона. Сюда вошли рекомендации и по легким бетонам. Монолитные перекрытия из легких бетонов классов по прочности на сжатие B15-B30 рекомендованы МГСН 4. 19–05 к применению в высотных зданиях, строящихся и в России (5, 6). Следует отметить применение монолитного легкого бетона класса B25-B30 в следующих примерах уникальных конструкций и сооружений гражданского назначения США, приведенных в информационных обзорах fib 1999–2000 гг.:

- складчатое оболочечное покрытие здания «Assembly Hall» Иллинойского университета; здесь 24 изогнутых сегментных пластины связаны предварительно напряженной кольцевой балкой диаметром 122 м;

- покрытия из сводов-оболочек, опирающихся на четыре контрфорса, пролетом 18–28 м для терминала аэропорта Кеннеди (Нью-Йорк).

При оценке в вышеуказанных странах эффективности применения монолитного легкого бетона в зданиях, особенно высотных, принимается во внимание не только эффект снижения их массы на 20–30 % с соответствующим снижением нагрузки на основания и возможным существенным сокращением расхода арматуры и расходов на возведение фундаментов. Большое значение для фирм, которые производят и транспортируют легкобетонные смеси, имеет фактор уменьшения их массы на 20–50 %. Немаловажно отметить, что проектировщики при выборе легкого бетона во многом руководствуются обеспечением безопасности эксплуатации здания, а именно: требованием его пожаростойкости. Исследования, выполненные во многих странах, установили значительное преимущество легкобетонных конструкций в огнестойкости не только в сравнении с металлоконструкциями, но и в сравнении с аналогичными конструкциями из тяжелых бетонов.

Монолитные легкие бетоны эффективны в применении и в промышленном строительстве. Это доказано примерами успешного возведения в скользящей опалубке, например в России, конструкций силосов, элеваторов диаметром более 20 м и высотой более 60 м. Следует особо отметить эффективность использования монолитных легких бетонов для изготовления конструкций с высокой температурой службы (от 900 до 1200 гр. С): фундаменты коксовых батарей, боров нагревательных печей на коксохимических и металлургических комбинатах и т. д. В транспортном строительстве из монолитного легкого бетона выполняют конструкции мостов, покрытия дорог и аэродромов. Эффективность применения легкого бетона в пролетных строениях мостов определяется прежде всего отношением собственного веса этих конструкций к общей расчетной постоянной и временной нагрузкам. Последние 20–30 лет в мировой практике строительства мостов в большинстве стран применяются практически только легкие бетоны.

В последние 5 лет НИИЖБом разработаны и успешно используются в облегченных монолитных и сборно-монолитных несущих каркасах зданий модифицированные конструкционные керамзитобетон и шлакопемзобетон классов по прочности на сжатие от B15 (М KB. 00) до B40 (М500) включительно при плотности в сухом состоянии $\gamma_0 = 1200\text{--}1900$ кг/м куб. (фото 2). При этом для густоармированных конструкций используются высокоподвижные (ОК до 25 см) бетонные смеси.

Масса конструкции при замене тяжелого бетона на легкий снижается от 25 до 100 %, т.е. до 2 раз. Характерно, что при этом по прочностным и деформативным характеристикам модифицированные конструкционные легкие бетоны близки к тяжелым бетонам.

Отсюда понятна возможность уменьшения сечения конструкции и снижения расхода арматуры, что и реализуется в современной практике строительства.

Применение модифицированного монолитного конструкционного легкого бетона весьма эффективно при надстройке реконструируемых малоэтажных зданий, в частности 5-этажек, исходя из требований минимизации увеличения нагрузки на существующий фундамент. В настоящее время такой опыт успешно реализуется в Москве. На фото 3 приведен один из примеров возведения такой надстройки из конструкционного модифицированного керамзитобетона. Здесь показано бетонирование предварительно напряженного перекрытия с натяжением прядевой арматуры в построечных условиях.

Последние 2–3 года практикуется также замена в реконструируемых зданиях железобетонных перекрытий, имеющих признаки начавшегося разрушения бетона или коррозии арматуры, на новые – из легких бетонов с целью частичной разгрузки фундаментов.

Анализ опыта комплексного применения легких бетонов, и в первую очередь модифицированных конструкционных (керамзитобетон, шлакопемзобетон) взамен равнопрочных тяжелых бетонов на природных плотных заполнителях, показывает следующие основные преимущества как технологического, так и конструктивного характера:

- уменьшение массы здания до 30 %, что дает возможность снизить расход стальной арматуры на 12–15 % в нижележащих конструкциях и фундаментах; снижение расходов на устройство последних и расходов на строительство здания в целом;

- снижением теплоотдачи здания или повышение на 10–20 % уровня его тепловой защиты за счет повышения в целом теплотехнической однородности оболочечной конструктивной системы здания (наружных стен, покрытий, контактируемых с элементами несущего каркаса из относительно низкотеплопроводных конструкционных легких бетонов);

- повышение пожаробезопасности здания за счет более высокой огнестойкости легкого бетона в сравнении с тяжелым;

- упрощение технологии производства железобетонных конструкций и изделий на предприятиях стройиндустрии, изготовляющих и несущие, и ограждающие конструкции, что обусловлено использованием на бетоносмесительном узле предприятия крупного заполнителя одного вида и, соответственно, сокращением необходимых трактов подачи материалов и технологического оборудования; снижение транспортных расходов.

Вышеизложенное свидетельствует о явной перспективности конструкционных легких бетонов для применения в современных конструктивных системах зданий и инженерных сооружений. В настоящее время это является одной из важнейших задач развития строительного комплекса страны.

Однако делать окончательные выводы о работоспособности конструкции только по результатам потери её массы или толщины несущей стенки совершенно недопустимо. Для этого необходимо понимание существа коррозионных процессов, свойств материалов, технологических сред, температурных условий работы, без которого не представляется возможным представить объективной картины влияния рабочих условий на остаточный ресурс работы оборудования. Кроме того, неизбежное чередование режимов эксплуатации по температуре, давлению, пусковым и остановочным режимам эксплуатации существенно влияет не только на скорость общей коррозии, но и на полное изменение физико-химической обстановки, которое приводит к погашению одного вида коррозии и появлению другого вида (например, замене общей коррозии коррозионным растрескиванием под напряжением, межкристаллитной коррозией и т. д.). Например, при эксплуатации оборудования нефтехимических производств в составе технологических отложений на внутренней поверхности характерно наличие различных сульфидов металлов, которые являются продуктом высокотемпературной или низкотемпературной сернистой коррозии. При свободном доступе кислорода в режиме

простая эти соединения вступают в химическую реакцию с образованием сероводородной, серной и полиотионовых кислот. Эти химические соединения обладают повышенной агрессивностью. Могут вызывать интенсивную коррозию углеродистых и низколегированных сталей, причем с изменением характера повреждений и появлением различных видов коррозии: общей, язвенной, коррозионного растрескивания. Причем низколегированные стали подвергаются неравномерной коррозии с очаговым характером повреждений, а аустенитные стали под действием полиотионовых кислот становятся чувствительны к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением. Таким образом, стояночная коррозия приводит к изменению не только количественных показателей коррозии, но и к изменению вида коррозионного поражения металла. Следует отметить, что наиболее характерные виды коррозионного поражения металла определяются не только условиями эксплуатации (температура, среда, давление) но и составом материала. Например, углеродистые стали в основном подвергаются высокотемпературной коррозии в сероводородных газовых средах при температуре выше 260 °C и содержанием H₂S более 0,005 %, поэтому эти стали в основном применяются ниже этой температуры. Для этих сталей наиболее вероятно общая коррозия, но возможна и язвенная, а иногда и коррозионное растрескивание под напряжением. Для защиты от высокотемпературной газовой коррозии применяются хромомолибденовые теплоустойчивые стали 15X5M, X9M, 15XM, 12X2M1, при коррозионном поражении которых характерны как общая коррозия, так и коррозионное растрескивание под напряжением. Наибольшей стойкостью к коррозионному поражению обладают высоколегированные хромоникелевые стали. Однако эти стали во многих случаях проявляют склонность к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением, причем ситуации по учету и прогнозированию реализации этой склонности еще недостаточно изучены, поэтому встречается определенные затруднения, что затрудняют подход к оптимизации применения этих сталей. Соответственно, это должно сказываться и на проведение экспертизы промышленной безопасности оборудования из этих сталей. Дополнительную сложность придает применение в конструкциях узлов и сочетания материалов разного легирования: двухслойные стали и разнородные сварные соединения, которые отличаются не только различным электрохимическим потенциалом, но и проявлением диффузионного перемещения атомов внедрения на границе сплавления при высокотемпературной эксплуатации. Кроме того, к усложнению работ по диагностике приводят также такие эксплуатационные изменения в металле, которые проявляются в основном при сверхнормативной эксплуатации: наводороживание, науглероживание, азотирование, изменение тонкой структуры металла, ползучесть и т. д. Всё отмеченное обуславливает необходимость во многих случаях проводить целые исследования по коррозии и металловедению.

Выводы и предложения.

1. Определение скорости общей коррозии, хотя и является методически сложным процессом, но не дает полную и тем более, окончательную картину служебных свойств нефтехимического оборудования, а поэтому не может служить окончательным критерием оценки работоспособности. 2. Для оценки эксплуатационной надежности конструкции необходимо инструментальное исследование наружной и внутренней поверхности несущих элементов с её контролем внешним осмотром, цветной дефектоскопией и замером твердости, по результатам которых определяется необходимость и разрабатывается методика дальнейших исследований металла и уточнение условий эксплуатации оборудования. 3. Во многих сложных случаях при составлении программы диагностирования необходимо предусмотреть назначение группы экспертов специальной подготовки для проведения совещания, на котором предметно обсуждаются специфические особенности конкретной работы и варианты возможных технических решений.

Оживление российской экономики и развитие строительного комплекса страны ведет к увеличению потребности в строительных материалах. Это обуславливает поиск путей снижения их себестоимости, расширения минерально-сырьевой базы за счет использования местных сырьевых ресурсов, а также новых эффективных технологий их производства. Технология производства самого распространенного на земле строительного материала – бетона, изделий и конструкций на его основе в настоящее время развивается, переживая эволюционные и революционные периоды. В настоящее время портландцемент является основным общестроительным вяжущим веществом. Однако производство портландцемента по обжиговой технологии достаточно энергоемко и сопровождается большими выбросами CO_2 . По данным Gigaton Throwdown Initiative (2009), «цементная индустрия ответственна за выбросы примерно 5 % общих выбросов CO_2 в атмосферу, или 2,1 гигатонн в год». Действительно, при производстве цементного клинкера в процессе разложения сырьевых компонентов образуется 0,53 кг CO_2 на тонну клинкера, еще 0,37 кг выделяется при сгорании топлива, и таким образом, общая нагрузка на окружающую среду достигает 0,9 т CO_2 / т клинкера. С учетом ежегодного роста объемов производства и применения цемента этот факт представляет значительную угрозу для человечества, в целом. Существующие на сегодня пути совершенствования производства клинкера, как правило, основаны на повышении энергоэффективности печей и помольных установок, использовании альтернативных источников топлива и сырья, улавливании и использовании CO_2 . Снижение содержания клинкера в цементе, в основном, достигается за счет применения активных минеральных добавок природного или искусственного происхождения при одновременном улучшении гранулометрического состава цемента. Хотя в последние годы в цементном производстве достигнуты вполне заметные успехи, похоже, что это направление себя почти исчерпало и вышло на определенное технологическое «плато». Поэтому создание альтернативных вяжущих и строительных материалов на их основе для замещения энергоемкого портландцемента остается актуальной задачей для современного строительного материаловедения. Одним из путей решения вышеизложенных проблем является разработка и широкое внедрение в производство бетонов на вяжущих щелочной активации (ААМ), в том числе с использованием геополимерных вяжущих (геополимерный бетон). Под вяжущими щелочной активации, в широком смысле слова, принято подразумевать вяжущие системы на основе тонкодисперсных аморфных или кристаллических алюмосиликатных материалов, затворяемых растворами щелочей или солей, имеющими щелочную реакцию (обычно растворами гидроксидов, силикатов или алюминатов натрия и калия). Геополимеры представляют собой подкласс ААМ, вяжущие свойства которых обеспечиваются преимущественно высококоординированными алюмосиликатами. Для образования геля в качестве первичной фазы имеющееся в наличии вступающих в реакцию количество ионов кальция, как правило, может быть очень низким, обеспечивая формирование псевдоцеолитных сетчатых структур вместо цепей обычно образующихся гидросиликатов кальция. В качестве прекурсоров для геополимерных вяжущих обычно используют низкокальциевые золы-уноса или кальцинированные глины, а в качестве активаторов – гидроксиды или силикаты щелочных металлов. Строго говоря, портландцементный камень и затвердевшее геополимерное вяжущее имеют различный химический состав и принципиальным образом различаются по структуре. Продукт гидратации цемента – кальциево-силикатный гидрогель, который имеет слоистую тоберморитоподобную структуру, формируемую листами из кальциево-кислородных октаэдров и цепочками из тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$, тогда как геополимерный камень представляет собой каркасный алюмосиликат из тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ и $[\text{AlO}_4]$, имеющих общие вершины. Начало работам в области вяжущих щелочной активации положил Пьюрдон в своем исследовании по влиянию растворов гидроксида натрия на техногенные алюмосиликатные материалы различного состава и морфологии. Развитие этого направления в бывшем СССР было

связано, прежде всего, с работами В. В. Глуховского, интенсивно проводившимися в 1960-е годы. Его усилиями были осуществлены первые серьезные попытки широкого внедрения шлакощелочных вяжущих материалов в промышленность.

Потенциально значительные экологические преимущества применения геополимерных вяжущих возникают, в первую очередь, за счет использования вторичного сырья, такого как доменный шлак или золы-уноса. Вовлечение техногенных отходов в хозяйственный оборот вместо природных сырьевых материалов являются для России весьма актуальным и требующим особого внимания, т.к. в горной, энергетической, добывающей, химической, металлургической и других отраслях промышленности РФ накопилось большое количество твердых отходов (по разным оценкам – от 80 до 100 млрд тонн и более).

Свойства геополимеров (физико-механические и эксплуатационные) функционально связаны с составом и дисперсностью минеральной составляющей, природой и содержанием щелочного компонента, наличием добавок, особенностями структурообразования и другими факторами. В качестве минеральных составляющих для производства геополимеров используются алюмосиликатные материалы как естественного (горные породы), так и техногенного происхождения (шлаки, золы, микрокремнезем и другие отходы производства). Из продуктов, не являющихся отходами производства, значительный интерес в качестве основы геополимеров у исследователей вызывает метакаолин ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), получаемый кальцинацией каолинита при 500–800°C. В отличие от минеральных отходов и побочных продуктов промышленности, метакаолин разных производителей характеризуется стабильностью химического состава, морфологии и дисперсности частиц, и поэтому он часто используется в качестве модельной системы при изучении формирования геополимерного камня. Среди всего многообразия металлургических и других видов шлаков практическое значение для получения вяжущих имеет доменный шлак. Этот побочный продукт выплавки чугуна обладает сходным с портландцементом химическим составом. Доменный шлак давно используется для получения бесклинкерных вяжущих щелочной активации [5]. Кроме того, он применяется в качестве модифицирующей добавки в геополимерных вяжущих на основе золы ТЭЦ. Шлакощелочные вяжущие (ШЩВ) получают из тонкоизмельченных до удельной поверхности 3000–3500 см²/г гранулированных металлургических шлаков, к которым добавляются малогигроскопичный щелочной компонент и вода (или заранее приготовленный раствор одного из доступных соединений щелочных металлов). Для производства таких цементов пригодны шлаки доменных, мартеновских, электротермофосфорных печей, а также шлаки цветной металлургии. Наиболее употребительными активаторами являются кальцинированная сода, поташ, фтористый натрий, растворимые щелочные силикаты (жидкое стекло, дисиликат натрия, метасиликат натрия), жидкие отходы соответствующих производств, плавы щелочей и т.д. Их доля составляет 2–5 % массы шлака в пересчете на Na_2O и 3–10 % в пересчете на K_2O . При щелочной активации гидратированный кремнезем связывается в гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция, при сульфатной – сульфат кальция непосредственно взаимодействует с глиноземом, гидроксидом кальция и водой с образованием гидросульфалюминатов. Росту активности шлака способствует и повышение его основности, а также введение силикатов щелочных металлов. Значительно увеличить гидравлическую активность шлаков позволяет их тонкое измельчение, в результате которого повышается реакционная активность зерен шлака. При этом особенно сильно действуют на проявление вяжущих свойств шлаков химическая активизация и тепловая обработка. Как правило, ШЩВ содержат дополнительно корректирующие добавки, предназначенные для обеспечения стехиометрии и фазового состава конечного продукта твердения. На основе бесцементного шлакощелочного вяжущего могут быть получены бетоны (ШЩБ) с прочностью на сжатие (в зависимости от примененного щелочного компонента) до 150 МПа, морозостойкостью до F1300 (при испытаниях при температуре -20°C) или до F140 (при испытаниях при температуре – 50°C), обладающие высокой

коррозионной стойкостью, в том числе в органонефтяной среде, трещиностойкостью, регулируемой деформативностью, повышенной выносливостью при динамических воздействиях. Такие бетоны можно укладывать в металлическую опалубку при температурах до -40°C без потери прочности от замораживания. Все другие характеристики бетонов, как правило, соответствуют требованиям ГОСТ на цементные бетоны. Отличительными особенностями бетонов на основе ШЩВ является возможность применения менее качественного заполнителя с суммарным содержанием пылевидных и глинистых частиц до 25 % и возможность снижения температуры тепловлажностной обработки сборных железобетонных конструкций или полный отказ от нее.

В 1984–1987 годах Липецкое управление треста Центрметаллургремонт своими силами спроектировало и построило опытнопромышленную установку по производству ШЩВ на объем производства 16 тысяч тонн молотого шлака в год. Это позволило полностью отказаться от цемента при строительстве жилья и выпуске сборного железобетона в объеме 45 тыс. кубометров товарной продукции. За 1987–1992 годы управлением на ШЩВ были построены два 20-этажных (автор проектов – НПСО «Монолит», г. Москва, гл. архитектор А. Н. Белоконь) и один 16-этажный дом (автор проекта – институт Липецкгражданпроект) 95.

Не случайно, что изобретение ШЩВ запатентовано в США, Германии, Японии, Канаде, Австралии, Финляндии, Франции. Опытом производства работ в зимнее время при строительстве домов интересовались специалисты из Финляндии, Японии и бывшей Югославии. Другим часто встречающимся на практике видом геополимерных материалов являются вяжущие на основе зол-уноса ТЭС.

Золы ТЭС представляют собой дисперсные частицы минеральной части угля или горючего сланца сферической формы, прошедшие в процессе сжигания топлива кратковременную тепловую обработку при температуре $1200 \dots 1600^{\circ}\text{C}$. При быстром охлаждении в золе образуется значительная доля стекловидных фаз, что наряду с высокой удельной поверхностью этого материала – $200 \cdot 600 \text{ м}^2/\text{кг}$ – является первопричиной проявления его вяжущих свойств. Применение золы в технологии геополимерных вяжущих позволяет значительно расширить сырьевую базу их производства.

В зарубежной практике (ASTM C618–12A) золы делятся на два класса – F и C. Содержание в них оксида кальция – менее и более 10 %, соответственно.

По данным Американского общества по испытанию материалов, для получения вяжущих предпочтительна низкокальцевая зола-унос класса F. Установлено, что зола-унос с высоким содержанием оксида кальция затрудняет протекание реакций полимеризации, ухудшает удобоукладываемость смеси и микроструктурные характеристики цементного камня. Для производства геополимерного бетона обычно используется низкокальцевая зола-унос, содержащая до 80 % алюмосиликатов, при соотношении Si/Al, равном 2. В такой золе обычно содержится около 10...20 % оксида железа, менее 5 % оксида кальция. Содержание несгоревшего топлива, определяемое по потере при прокаливании, в золе-уносе должно составлять менее 2 %. Этот показатель является важным фактором, влияющим на механические свойства вяжущего. Однако, как показывает практика, требования к содержанию этого снижающего качество золы компонента для производства геополимера могут быть менее жесткими, чем при использовании золы в качестве компонента композиционного вяжущего на основе портландцемента. Так, европейские стандарты EN206–1 и EN450–1 ограничивают потери при прокаливании 2...5 %. Результаты испытания золы, содержащей 23 % несгоревшего угля, показали, что ее нельзя применять в производстве армированного бетона. Однако эта же зола была с успехом использована для синтеза геополимера.

Важную роль в процессе полимеризации алюмосиликатов золы играет вид щелочного активатора. В качестве щелочного активатора используются растворы, содержащие гидроксид натрия NaOH или гидроксид калия KOH, а также и силикат натрия или силикат калия, причем

скорость протекания геополимерных реакций выше, если щелочным активатором служит раствор гидроксида щелочного металла, силиката натрия или силиката калия, в сравнении со скоростью реакций при использовании только гидроксида щелочного металла.

Основным компонентом геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород (минерально-щелочного вяжущего) являются измельченные магматические горные породы алюмосиликатного состава, твердение которых активируется щелочными материалами. В зависимости от реакционной активности магматических пород будет варьироваться активность вяжущего. Для активизации процессов твердения геополимерных вяжущих на основе магматических горных пород применяются гидроксид натрия технический, гидроксид калия, натриевое, калиевое, калий-натриевое жидкое стекло, кальцинированная сода. Роль добавок-модификаторов выполняют доменный шлак, каолин, метакаолин и гидроксид алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$. К алюмосиликатам, пригодным для получения геополимеров, относятся природные и дегидратированные глины, в том числе указанный выше метакаолин.

Исследование влияния количества щелочного компонента на прочностные свойства геополимеров показало, что по мере увеличения содержания щелочи в их составе до пределов, при которых соотношение $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1:1$, вяжущая способность таких композиций повышается. Установлено также, что наличие в обожженных глинистых материалах определенного количества стекловидной фазы, а в дегидратированных глинах – аморфного кремнезема позволяет им более активно влиять на процессы структурообразования и формирования свойств композиционных геополимеров. Технологические аспекты приготовления бетонов на основе вяжущих щелочной активации и их строительно-технические свойства, в основном, аналогичны технологии и свойствам бетонов на основе портландцемента, хотя в синтезе геополимерных бетонов, как правило, всегда требуется дополнительная термическая активация. Температура значительно ускоряет процесс растворения исходного алюмосиликатного каркаса и тем самым оказывает важное влияние на твердение геополимерных композиций, особенно в начальный период реакции. Зола-унос при обычной температуре вступает в реакцию очень медленно и даже через месяц твердения в обычных условиях обеспечивает незначительную прочность. Однако выдерживание свежеприготовленного изделия при 70–90 °С в течение от нескольких часов до 1 суток позволяет достичь практически конечной прочности, составляющей до 60–70 МПа (по некоторым данным, прочность геополимеров может достигать 100 МПа и более).

Бетоны, получаемые на основе вяжущих щелочной активации (геополимеров), обладают низкой проницаемостью и высоким показателем pH поровой жидкости, что обеспечивает хорошую защиту арматурной стали по отношению к хлоридной коррозии. Высокая стойкость геополимеров в агрессивных средах, устойчивость при перепадах температуры делает эти материалы пригодными для работы в неблагоприятных условиях. Так, в соответствии с литературными данными, геополимеры представляют интерес в качестве матрицы для иммобилизации токсичных и радиоактивных отходов. По сравнению с портландцементом, используемым в настоящее время для отверждения ядерных отходов низкой и средней активности, геополимеры обеспечивают большую стабильность защитных оболочек. Вместе с тем нельзя не признать, что многие публикации о химии и технологии геополимеров носят явно спекулятивный характер, в то время как технические трудности их применения пока еще слишком велики, чтобы использование геополимеров в технологии бетона хотя бы в отдаленной степени приближалось к объемам применения портландцемента. Причинами являются и недостаточная их изученность, особенно с позиций обеспечения долговечности конструкций, и отсутствие нормативной документации, и неоднородность сырьевых материалов, а также многие другие факторы. Однако существующие подходы к обеспечению устойчивого развития строительства из конструкционного бетона уже явно недостаточны [8]. На смену уже во многом выработавшей себя «цементной стратегии» применения порт-

ладцемента и его разновидностей приходят новые, учитывающие последние достижения в области материаловедения, технологии бетона и расчета конструкций на основе их полного жизненного цикла. Они могут стать основой для решения глобальной задачи – сдерживать все возрастающую нагрузку на окружающую среду, обеспечив 50 %-ное снижение эмиссии CO_2 и энергопотребления в строительном производстве. Отсюда особую остроту приобретает ставшая крылатой фраза П/К. Мехта: «...будущее индустрии цемента и бетона будет в значительной степени зависеть от нашей способности взаимоувязать их рост с целью устойчивого развития»

4.5.2. Материалы гидротехнического бетона

Основные свойства бетона последовательно определяются качеством основных компонентов смеси, ее рецептурой, видом перемешивания, уплотнения и всех других входящих факторов. Каждый применяемый материал для приготовления бетона должен удовлетворять требованиям соответствующих ГОСТ.

4.5.2.1. Мелкий заполнитель

Песком называют рыхлую смесь минеральных зерен с крупностью до 5 мм, полученную в результате естественного разрушения или дробления горных пород. В состав смеси входят собственно песчаные частицы с размером от 5 до 0,05 мм, пылеватые – 0,05–0,005 мм и глинистые – менее 0,005 мм. При использовании в бетонах песок должен удовлетворять требованиям ГОСТ 4797–69 «Бетон гидротехнический. Технические требования к заполнителям». Качество песка определяется крупностью, зерновым и минералогическим составами, формой зерен, количеством и видом примесей. Пылеватые частицы по основным свойствам близки к песчаным, в то время как глинистые покрывают основные зерна тонким слоем, снижая сцепление с цементным камнем, или агрегируют друг с другом, снижая тем самым прочность бетона. Песок в природных условиях находится в смеси с гравием. При его содержании в количестве более 50 % смесь называется песчано-гравийной (ПГС), а при меньшем – гравийно-песчаной (ГПС). Распространенными в практике гидротехнического строительства являются кварцевые пески, а также пески от дробления морозостойких горных пород. Благодаря высокой прочности зерен обеспечивается необходимая марка бетона. Однако пески дробленные и материал из отсева дробления имеют угловатые и лещадные зерна, что снижает пластичность бетонной смеси и повышает водоотделение при сравнительных испытаниях с природными песками. Этот недостаток компенсируется увеличением расхода цемента или применением добавок в бетоны. Морские пески состоят из кварцевых частиц с незначительным содержанием глинистых частиц, их зерновой состав более крупный, чем у природных песков. Пески из осадочных и рыхлых изверженных пород могут быть использованы в бетонах после лабораторных испытаний и технико-экономического обоснования. Допустимое содержание вредных включений в песке представлено в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Допустимое содержание вредных включений в песке, % по массе, для гидротехнических бетонов

Примеси	Зона переменного уровня	Подводный	Надводный
Глина, ил и др. пылевидные фракции, определяемые отмучиванием, не более в том числе глина	1 0,5	4 2	3 2
Сернокислые и сернистые соединения в пересчёте на SO_4	1	1	1
Органические примеси, определяемые методом окрашивания	Окраска не темнее цвета эталона по ГОСТ 102 68–80		
Опал и др. аморфные видоизменения кремнезёма	Не допускается без проверки		

Для бетонов с F 300 и более песок должен выдерживать не менее 5 циклов в растворе сернокислого натрия с потерей массы не более 10%. Показателями качества песка являются: зерновой состав; модуль крупности; суммарный остаток на сите с ячейкой 0,63 мм; содержание зерен размером менее 0,14 мм, пылеватых и глинистых частиц; плотность насыпная и средняя; пустотность и суммарная поверхность зерен. Песок должен содержать зерна различных размеров с достижением минимальных пустотности и суммарной поверхности частиц. Тем самым обеспечивается минимальный расход цемента при получении плотной структуры бетона. Модуль крупности песка ($M_{кр}$) принимается как сумма полных остатков на стандартных ситах, деленная на 100:

$$M_{кр} = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14}}{100}$$

В зависимости от зернового состава пески делятся на отдельные группы, указанные в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Классификация зернового состава песков

Группа песка	Модуль крупности	Полый остаток на сите $N_{0,63}$, % по m
Крупный	Свыше 2,5	Свыше 45
Средний мелкий	2,0...2,5	30...45
Мелкий	1,5...2,5	10...30
Очень мелкий	1,0...1,5	До 10

В гидротехническом строительстве используются пески крупные – $M_{кр} = 3,5-2,5$; средние – $M_{кр} = 2,5-2,0$; мелкие – $M_{кр} = 2,0-1,5$. Суммарная площадь поверхности частиц S_n песка определяется по формуле А.С. Ладинского:

$$S_n = \frac{16,5K_{фп}}{1000\rho_n} \cdot (a_{2,5} + 2a_{1,25} + 4a_{0,63} + 8a_{0,135} + 16a_{0,14} + 32a_{0,1})$$

где a_n – частные остатки на ситах каждой фракции песка; $K_{фп}$ – коэффициент формы зерен песка, принимаемый для речного песка – 1,3...1,5; для горного – 1,7...1,9. Увеличение поверхности песка, а соответственно и возрастание пустотности приводит к повышению расхода цемента для достижения необходимой прочности. Дополнительно возрастает водопотребность и расход воды на приготовление таких бетонов. Зерновой состав применяемых песков должен соответствовать стандартной гранулометрической кривой (рис. 4.5).

И в зависимости от величины суммарной поверхности пески разделяются, на крупные со значением S_n не превышающим 50, средние – 51–100; мелкие – 101–200 и очень мелкие – 201–300 $\text{см}^2/\text{г}$. Важным показателем качества является пустотность песка, вычисляемая в долях от единицы:

$$P_n = 1 - \frac{P_{nn}}{P_n}$$

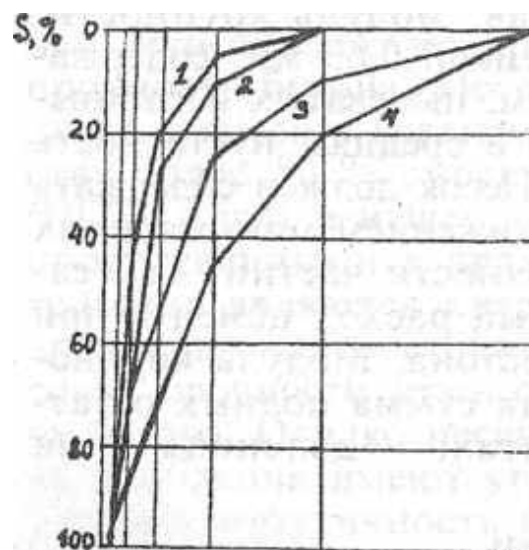


Рис. 4.5. Зерновой состав песка для бетона:

1 – допустимая нижняя граница крупности песка d , мм (модуль крупности 1,5); 2 – рекомендуемая нижняя граница крупности песка (модуль крупности 2) для бетонов класса В 15 и выше; 3 – рекомендуемая нижняя граница крупности песка для бетонов класса В 25 и выше; 4 – допустимая верхняя граница крупности песка (модуль крупности 3,25); d – размер отверстий сит, мм; S – полные остатки на контрольных ситах, %

где $P_{\text{пн}}$ – насыпная плотность песка кг/м^3 ; $P_{\text{п}}$ – плотность зерен песка, кг/м^3 . Значение пустотности определяет необходимый объем цементного теста для создания плотной упаковки и тем самым определяет экономичность состава бетона. Для качества песков величина пустотности составляет 30–38 %. при нерациональном гранулометрическом составе она увеличивается до 40–42 %.

4.5.2.2. Крупный заполнитель

В качестве крупного заполнителя тяжелых бетонов применяют щебень и гравий, размером зерен до 70–50 мм получаемый дроблением и последующим рассевом скальных пород. Гравий является результатом естественного разрушения и перемещения скальных горных пород или его получают рассевом гравийно-песчаных смесей. Крупный заполнитель образует жесткий скелет бетона, межзерновая пустотность которого последовательно заполняется зернами песка и частицами цемента. Качество такого заполнителя определяется крупностью, зерновым составом, формой зерен, свойствами исходной горной породы (прочность, морозостойкость, водопоглощение, минералогический состав и т.д.). Крупность заполнителя должна составлять не более $1/4$ минимального сечения элемента конструкции и не более $2/3$ расстояния между стержнями арматуры. При бетонировании плоских конструкций (плит, полов, покрытий) допустимая крупность щебня составляет до $1/3$ их толщины. В массивных гидротехнических сооружениях может применяться втапливание камня в бетонную смесь с последующей вибрацией. Полученный камнебетон обладает высокими физико-механическими свойствами при пониженном расходе вяжущего.

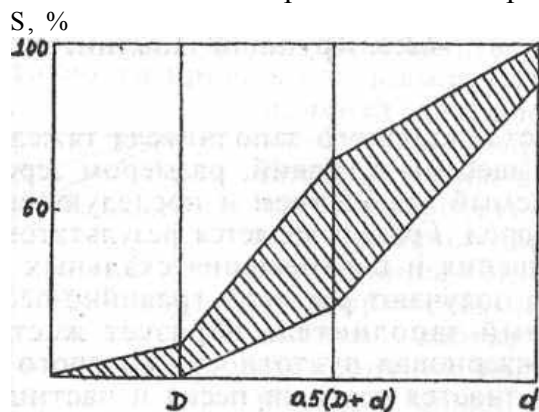


Рис. 4.6. Зерновой состав щебня (гравия) D – наибольший и d – наименьший предел размера фракций; S – полный остаток на ситах, %

По крупности зерен щебень и гравий разделяют на отдельные фракции, дозируемые при приготовлении бетонной смеси: 5–10; 10–20; 20–40; 40–70 мм. Зерновой состав смеси должен обеспечивать минимальную пустотность, для чего соотношение отдельных фракций должно соответствовать рекомендациям для тяжелых бетонов (рис. 4.6). Выдерживание данных рекомендаций увеличивает прочность и модуль деформаций, снижается усадка и ползучесть при сниженных расходах цемента. Прочность крупного заполнителя должна быть не менее, чем в 1,5 раза больше для бетона ниже класса В22 и в 2 раза для бетонов класса В22 и выше. Марка по дробимости гравия не должна быть ниже 8 для бетонов класса В30 и выше.

Таблица 4.5

Рекомендуемое соотношение между фракциями заполнителя

Наибольшая крупность зёрен, мм	Содержание, %, 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

Основные требования к крупному заполнителю гидротехнического бетона в зависимости от его назначения представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.6

Физико-механические свойства крупного заполнителя для гидротехнического бетона

Показатели	Зона переменного уровня воды	Надводная и подводная зоны
Предел прочности при сжатии в насыщенном водой состоянии породы, подлежащей дроблению в щебень, % от требуемой марки бетона, не менее:		
для изверженных горных пород	300	250
для карбонатных пород	250	200
Прочность (дробимость в цилиндре) крупного заполнителя размером по 40 мм по ГОСТ 82 67–82	Др-8	Др-12
Содержание зёрен слабых пород в отдельных фракциях заполнителя, % от массы, не более	5	10
Содержание глины, ила и мелких пылевидных примесей, определяемых отмучиванием, % по массе в сумме, не более	0,5 1	2
Содержание игловатых и лещадных зёрен, % от массы, не более	15	
Сернокислые и сернистые соединения в пересчете на SO_3 по массе, не более	0,5	
Плотность породы (зерен), $г/см^3$ не менее	2,4	2,3

Примечание. В числителе приведено содержание отмученных частиц в крупном заполнителе для бетона тонкостенных и предварительно напряженных конструкций.

К числу вредных примесей, влияющих на прочность и долговечность бетона, относятся органические примеси, глинистые, илистые и пылевидные частицы, а также аморфные видоизменения кремнезема в горной породе заполнителя. При повышенных содержаниях вредных примесей, превосходящих требования ГОСТ 8267–82, осуществляется промывка крупного заполнителя водой, выполняемая в карьерах на гравиемочно-сортировочных барабанах. При заданной морозостойкости бетонов щебень и гравий проходят испытание на соответствие этих показателей по ГОСТ 10060–76. Традиционные приемы производства заполнителей для гидротехнического строительства предполагает отдельное складирование заготовленных к строительному сезону песка, щебня и гравия. На период выполнения работ требуется дополнительное транспортное и технологическое оборудование, что в итоге удорожает бетон и снижает его качество. Скоростные методы строительства основываются на использовании несортированных ГПС с необходимой коррекцией зернового состава дробления, применением широких фракций заполнителей и работе по бесскладской технологии. Основываясь на известных данных, оптимальный состав смеси крупного и мелкого заполнителей графически определяется пространством, находящимся между двумя гранулометрическими кривыми, представленными на рис. 4.7. Данный метод установления пригодности смесей применяется в странах Западной Европы, Америки.

Рациональная область, находящаяся между линиями рассева ПГС А и Б, обеспечивает оптимальные значения и площади поверхности и пустотности зерен заполнителя. В связи с этим расход вяжущего для приготовления бетона на таких заполнителях является минимальным. Область, ограниченная линиями Б и В характеризует заполнитель с увеличенными значениями площади поверхности и пустотности зерен, что увеличивает потребность в вяжущем. Использование смесей, находящихся выше линии В, связано с дальнейшим повышением

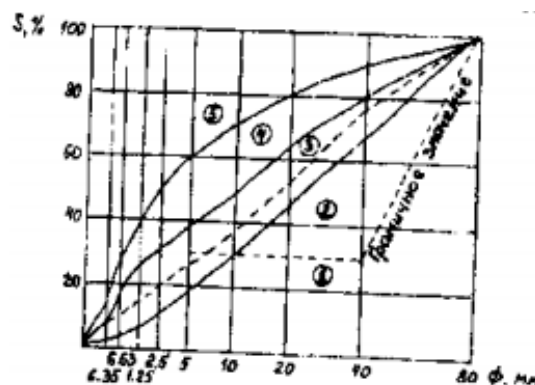


Рис. 4.7. Граничные линии зернового состава ПГС с максимальной крупностью смеси (D_{max}) 80 мм. 1 — заполнитель непригоден; 2 — возможно применение в виде исключения; 3 — оптимальный состав смеси; 4 — пригодный состав; 5 — заполнитель непригоден

расхода вяжущего, так как сама смесь является мелкозернистой. Бетоны на такой смеси обладают рядом особенностей, повышенная усадка и ползучесть, большая деформативность. Использование смесей, находящихся вне области А, приводит к получению бетона неплотной структуры, так как суммарная поверхность зерен заполнителя недостаточна для получения добротного композиционного материала. Реальные составы ГПС редко полностью соответствуют рациональным областям. Необходимы специальные приемы по упорядочению содержания зерен различного состава.

Таковыми могут быть: – разделение ГПС на песок и основные фракции, из которых впоследствии составляется необходимая смесь. Способ может применяться только для бетонов повышенной прочности или если технология является очень чувствительной, так как во всех остальных случаях он «очень трудоемок»; – осреднение ГПС различной крупности, что достаточно трудно реализовать. В соответствии с этим широко данный прием не применяется; – смешивание ГПС, принимаемой за основную, с установленным количеством зерен крупного заполнителя, чаще всего щебня. Именно последнее направление корректировки зернового состава ГПС было использовано при строительстве Бурейской ГЭС. После прохождения щековой дробилки несортированная ГПС по своему зерновому составу попадала в оптимальную область (рис. 4.7). Становится возможным поднять скорость выполнения бетонных работ, используя несортированную ГПС с коррекцией зернового состава дроблением. Отпадает необходимость в строительстве крупных стационарных предприятий, используются передвижные дробильно-сортировочные установки, становится возможным работать по бесскладским технологиям. При больших объемах бетонных работ в гидротехническом строительстве освоение новых приемов подготовки смеси заполнителей является важным резервом ускорения строительства.

4.5.2.3. Проектирование состава гидротехнического бетона

Проектирование состава бетона заключается в назначении рационального содержания входящих в его состав компонентов на 1 м^3 смеси с обеспечением всех требуемых свойств при минимальном расходе вяжущего. Для выполнения расчетов применяются экспериментальные или расчетно-экспериментальные методы. Необходимые исходные данные включают свойства сырьевых компонентов, требуемую подвижность или жесткость бетонной смеси, класс или марку бетона по прочности на сжатие, марку по водонепроницаемости и морозостойкости. Расчет, выполненный для материалов в сухом состоянии, называют номинальным. После его определения производится перерасчет с поправкой на фактическую влажность поступающих материалов. Этот состав называют рабочим. Расчетно-экспериментальный метод использует формулы, таблицы и графики и позволяет оперативно определить ориентировочный состав бетона, который необходимо экспериментально откорректировать. Экспериментальный метод применяется при колебаниях свойств поступающих материалов и значительных объемах получаемого бетона. ВНИИГ им. Б. В. Веденеева, основываясь на большом объеме фактических данных, предложил метод назначения состава гидротехнического бетона. На первом этапе определяется соотношение между фракциями крупного заполнителя при условии получения смеси с наибольшей плотностью. Число и размеры фракций устанавливают исходя из вида конструкции, ее геометрических размеров и плотности армирования (СНиП 111–15–76) (табл. 4.7).

Подвижность и удобоукладываемость бетонной смеси с введением поверхностноактивных добавок назначают по данным таблицы 4.8.

В соответствии с условиями эксплуатации бетона в гидротехническом объекте назначается водоцементное отношение (табл. 4.9).

Таблица 4.7

Соотношение фракций крупного заполнителя

Число фракций	Предельная крупность зёрен, мм	Размер фракций, мм	Содержание фракций смеси, % по массе	Ориентировочная насыпная плотность, кг/см ³
2	20	5–10	35	1420
		10–20	65	
3	40	5–10	20	1470
		10–20	25	
		20–40	55	

Таблица 4.8

Подвижность и удобоукладываемость бетонных смесей

Конструкции	Удобоукладываемость	Осадка конуса бетонной смеси, см			
		На обычном песке		На мелкозернистом песке	
		Без добавок	С добавкой	Без добавок	С добавкой
Массивные бетонные и малоармированные, с содержанием арматуры до 0,5 %	20–30	2–4	1–3	1–3	1–2
Железобетонные, с содержанием арматуры до 1 %	10–20	4–8	3–6	3–6	2–5
То же, более 1 %	5–10	8–14	6–10	6–10	5–8

Таблица 4.9

Максимально допустимое значение В/Ц

Зона сооружения	Немассивные железобетонные конструкции		Наружная зона массивных конструкций	
	В морской воде	В пресной воде	В морской воде	В пресной воде
Бетон надводных частей конструкций, периодически омываемых водой	0,55	0,60	0,65	0,65
Бетон подводный: напорных конструкций безнапорных конструкций	0,55 0,60	0,58 0,62	0,56 0,62	0,58 0,62
Бетон зоны переменного уровня воды: в особо суровых условиях в суровых условиях	0,42 0,45	0,47 0,50	0,45 0,47	0,48 0,52
Бетон внутренней зоны	Устанавливается экспериментально, но не более 0,75			

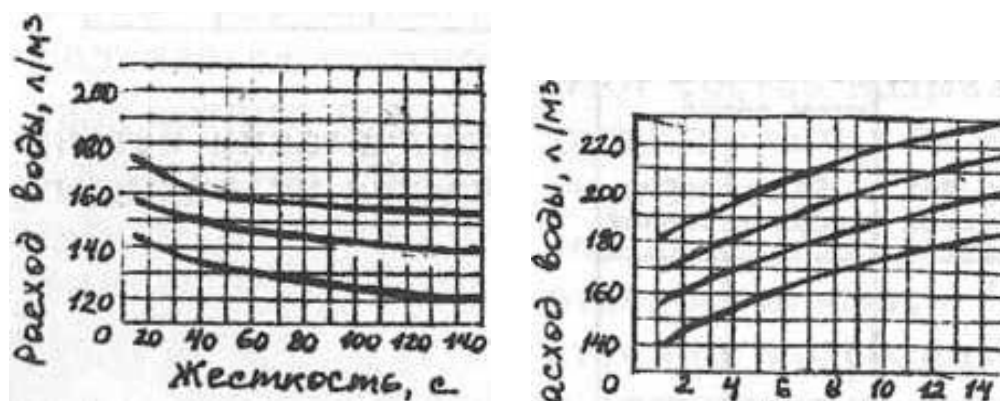


Рис. 4.8. График водопотребности бетонной смеси, изготовленной на основе портландцемента, песка средней крупности и гравия с крупностью: 1–80 мм. 2–40 мм. 3–20 мм. 4–10 мм; а – пластичные смеси, б – жесткие смеси. Определение жесткости: I – по ГОСТ 10181–76; II – по техническому вискозиметру

Для установления характеристики состава бетона изготавливают несколько экспериментальных замесов, отличающихся один от другого, изменяемым на 0,02–0,03 значением доли

песка g Оптимальное значение g определяется по экспериментальным кривым зависимости жесткости или подвижности бетонных смесей, как обеспечивающее наилучшую удобоукладываемость смеси. Начальное значение g принимают по данным табл. 4.9.

Примечание. Помещенные значения g рекомендуются для бетонных смесей подвижностью 2 см. С увеличением подвижности на каждые 2 см необходимо увеличивать значение g на 0,01. Необходимый расход воды определяется на рис. 4.8.

Таблица 4.10

Ориентировочное значение доли песка g в смеси заполнителя

Расход цемента кг/м ³	Максимальная крупность зёрен щебня, гравия, мм	Модуль крупности песка	г при использовании	
			щебня	гравия
250	20	1,5–2,0	0,35	0,33
		2,0–2,5	0,36	0,34
	40	1,5–2,0	0,34	0,33
		2,0–2,5	0,35	0,34
	70	1,5–2,0	0,33	0,32
		2,0–2,5	0,34	0,33
300	20	1,5–2,0	0,34	0,32
		2,0–2,5	0,35	0,33
	40	1,5–2,0	0,33	0,32
		2,0–2,5	0,34	0,32
	70	1,5–2,0	0,32	0,31
		2,0–2,5	0,33	0,32
350	20	1,5–2,0	0,32	0,30
		2,0–2,5	0,33	0,31
	40	1,5–2,0	0,31	0,30
		2,0–2,5	0,32	0,31
	70	1,5–2,0	0,31	0,30
		2,0–2,5	0,32	0,31
400	20	1,5–2,0	0,30	0,28
		2,0–2,5	0,31	0,29
	40	1,5–2,0	0,29	0,28
		2,0–2,5	0,30	0,29
	70	1,5–2,0	0,29	0,28
		2,0–2,5	0,30	0,29

По результатам экспериментов из опробованных значений g отбирается то, которое соответствует наименьшей жесткости или наибольшей подвижности. На этом этапе уточняется необходимое количество воды для получения бетонной смеси с заданной удобоукладываемостью. После этого выполняется уточнение величины В/Ц, назначенной из условий эксплуатации бетона. Для этого продолжают экспериментальные исследования с изменением первоначально принятого В/Ц последовательно на 0,03–0,05 в сторону его уменьшения. Окончательно из трех полученных значений В/Ц утверждается наибольшее, удовлетворяющее требованиям по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости. Потребность в материалах устанавливают методом абсолютных объемов. Последовательность расчетов следующая:

$$\text{Расход цемента: } C = \frac{B}{B / C}$$

$$\text{Объем цементного теста } (V_{\text{цт}}), V_{\text{цт}} = \frac{C}{\rho_{\text{ц}}} + B$$

$$\text{Объем заполнителей. } V_3, \text{ л: } V_3 = 1000 - V_{\text{цт}}$$

$$\text{Объем песка } V_{\text{п}} \text{ и масса песка } \Pi, \text{ кг: } V_{\text{п}} = rV_3; \Pi = \rho_{\text{п}} V_{\text{п}}$$

$$\text{Объем щебня } V_{\text{щ}}, \text{ л и масса щебня } \Pi_{\text{щ}}, \text{ кг: } V_{\text{щ}} = V_3 - V_{\text{п}}; \Pi_{\text{щ}} = \rho_{\text{щ}} V_{\text{щ}}$$

4.6. Расчетно-экспериментальный метод подбора

Метод расчета был предложен проф. Б. Г. Скрамтаевым и основывается на законе «абсолютных объемов». Данный метод повсеместно применяется для расчета обычных тяжелых бетонов. При его использовании применительно к гидротехническим бетонам особенностью является учет условий долговечности, обеспечивающихся значением В/Ц, получением плотной структуры, применением микронаполнителей. Основа данного метода состоит в совместном решении уравнений:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} = 1$$

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{П}{\rho_{п}} = \Pi_{щ} \alpha_{щ} \frac{Щ}{\rho_{пщ}}$$

где Ц, В, П, Щ – расход каждого из компонентов в кг на 1 м³ бетонной смеси, кг; $\rho_{ц}$, $\rho_{в}$, $\rho_{п}$, $\rho_{пщ}$ – соответствующие абсолютные плотности компонентов, кг/м³; Г1 – пустотность крупного заполнителя; α – коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя; ρ – насыпная плотность крупного заполнителя.

Первое уравнение показывает, что при отсутствии вовлеченного воздуха абсолютные объемы компонентов бетонной смеси равны 1 м³. по второму – абсолютный объем растворной части равен пустотности крупного заполнителя с поправкой на некоторую раздвижку самих зерен. Необходимое количество воды зависит от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и крупности зерен заполнителей и определяется по таблицам или графикам. Масса цемента устанавливается по отношению В/Ц, определяемому по формуле, связывающей прочность бетона с активностью применяемого цемента. – расходом воды и качеством заполнителей:

$$R_6 = A R_{ц} (Ц/В, 0,5) \text{ при } Ц/В < 2,5 \text{ или } R_6 = A R_{ц} (Ц/В + 0,5) \text{ при } Ц/В > 2,5,$$

где R_6 – прочность бетона (марка) в возрасте 28 суток; A , A_1 – коэффициенты, определяющие качество заполнителей; $R_{ц}$ – активность цемента

Данные уравнения позволяют определить значение Ц/В для обеспечения марочной прочности:

$$В/Ц = A R_{ц} / R_6 + 0,5 A R_{ц} \text{ при } В/Ц > 0,4;$$

$$В/Ц = A_1 R_{ц} R_6 - 0,5 A_1 R_{ц} \text{ при } В/Ц < 0,4.$$

Коэффициенты A и A_1 зависят от качества заполнителей и имеют следующие значения: для высококачественных заполнителей (чистый фракционированный щебень и песок) – 0,65; 0,43.

для рядовых заполнителей – 0,6; 0,4.

для гравия и мелкого песка – 0,55; 0,37.

Поскольку величины В/Ц определяются по формулам, применяемым для обычных тяжелых бетонов, необходимо полученные значения сопоставить с требованиями, приведенными в табл. 4.10. В гидротехнических бетонах В/Ц в дополнение к прочности должно обеспечивать водонепроницаемость и морозостойкость. В случае, когда значение В/Ц, определенное из условий обеспечения прочности, превышает необходимое значение по условиям долговечности, в состав бетона рационально введение микронаполнителей. Необходимую прочность бетона обеспечивает цемент, а требуемая плотность структуры создается за счет дополнительного количества вводимой добавки. Ее количество может быть найдено из формулы:

$$Д = \frac{В / Ц - В / Ц^Д}{В / Ц^Д} \cdot Ц,$$

где В/Ц – водоцементное отношение из условий прочности; (В/Ц) – водоцементное отношение из условий долговечности.

Количество воды затворения определяется удобоукладываемостью бетонной смеси. При этом учитывается вид используемого цемента, заполнителя и крупного песка. Ориентировочный расход воды устанавливается из графических или табличных данных (табл. 4.11). После уточнения значения В/Ц и необходимого количества воды (В) становится возможным определить расход цемента.

Таблица 4.11

Ориентировочный расход воды в зависимости от вида заполнителя и характера бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонной смеси		Расход воды, л/м ³ бетонной смеси, при наибольшей крупности заполнителя, мм			
Осадка	Жёсткость	10	20	40	70
Гравий					
9–12	-	215	200	185	170
6–8	-	205	190	175	160
3–5	-	195	180	165	150
1–2	-	185	170	155	140
-	30–50	165	160	150	-
-	60–80	155	150	140	-
-	90–120	145	140	135	-
-	150–200	135	130	128	-
Щебень					
9–12	-	230	215	200	185
6–8	-	220	205	190	175
3–5	-	210	195	180	165
1–2	-	200	185	170	155
-	30–50	175	170	160	-
-	60–80	165	160	150	-
-	90–120	160	155	140	-
-	150–200	-	-	-	-

Примечания. 1. Данные таблицы справедливы для бетонов с расходом цемента не более 400 кг м³ при применении песков средней крупности. 2. При использовании мелкого песка расход воды увеличивается на 10 л. 3. При применении пуццоланового портландцемента расход воды увеличивается на 15–20 л: $\Pi = \frac{B}{B/\Pi}$. Найденное значение расхода цемента для бетонной смеси с заданной удобоукладываемостью не должно быть ниже минимальных значений, представленных в табл. 4.11. Крупный заполнитель, образующий жесткий скелет бетона, определяется из условия максимального заполнения объема с поправкой на его раздвижку растворной частью, $\Pi = \frac{1000}{V_{ш}^n \cdot \alpha \cdot p_{ш}^{\alpha} + p_{ш}}$ где α – коэффициент раздвижки зерен щебня раствором (табл. 4.11).

Таблица 4.12

Минимальный расход цемента, кг м³

Консистенция смеси	Предельная крупность заполнителя, мм			
	10	20	30	40
Особо жесткая, Ж > 200 с	160	150	140	130
Жёсткая, Ж = 30 – 200 с	180	160	150	140
Малоподвижная, ОК = 1 – 3 см, Ж = 15 – 20 с	200	180	160	150
Подвижная, ОК = 4 – 15 см	220	200	180	160
Литая, ОК > 15 см	250	220	200	180

В случае использования пластифицирующих добавок осадка конуса бетонной смеси уменьшается на 30–40% в сравнении со смесью без добавки, так как добавки этого типа сильнее снижают жесткость, чем подвижность. Для достижения равновеликой жесткости смесей

с добавкой ПАВ и без добавки осадка конуса уменьшается. Расход песка определяется как свободная оставшаяся часть объема после установления расхода цемента, воды и крупного заполнителя. При использовании добавок ПАВ учитывается объем вовлеченного в состав бетонной смеси воздуха (V_v):

$$\Pi = [1000 - (\Pi/p_{\text{ц}} + B + \Pi/p_{\text{ш}} + V)]p_{\text{п}}$$

Таблица 4.13

Коэффициент раздвижки α для пластичных бетонных смесей.

Расход цемента, кг/м ³	В/Ц				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,30	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-
400	1,40	1,46	-	-	-

Примечания. 1. Значения представлены для песков с еодопотребностью 7%. При увеличении водопотребности (V_p) на каждый процент уменьшается на 0,03, а при уменьшении – возрастает соответственно на 0,03. 2. Для жестких бетонных смесей при $\Pi < 400$ кг м³ = 1,05–1,15.

Расход компонентов, определенный с использованием формул, является расчетным и требует экспериментальной проверки и корректировки. Для этого производятся замесы, в одном из которых используется найденное значение В/Ц, а в двух других – измененное от расчетного на $5 \pm 10 - 15 \%$. Такой прием Позволяет установить истинное значение В/Ц, а также экспериментально корректируется водосодержание бетонной смеси, которое до этого было ориентировочно определено по табл. 4.8. Для достижения удобоукладываемости в экспериментальных замесах при необходимых добавлениях воды увеличивают соответственно расход цемента для сохранения неизменным первоначально найденного значения В/Ц. При избыточном содержании воды в бетонной смеси удобоукладываемость уменьшается добавлениям в равных пропорциях крупного и мелкого заполнителя с тем, чтобы не нарушить их относительное содержание в бетонной смеси По результатам экспериментов назначается окончательный расход компонентов.

4.7. Расчет состав бетона по заданной водонепроницаемости

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что марку бетона по водонепроницаемости возможно установить исходя из определенного значения относительного водосодержания цементного теста в бетоне (X). Величина X позволяет определять прочность бетона ($R_{сж}$) в зависимости от особенностей заполнителей (V , и расхода цемента, устанавливаемого по активности цемента (R) и коэффициенту качества цемента

$$R_{сж} = \frac{K_z \cdot K_k \cdot K_{ш}}{x^2}$$

где K_z – коэффициент вида заполнителей (табл. 4.14); K_k – коэффициент качества в зависимости от нормальной густоты равен 2.55–4.29 нг.

С изменением величины X изменяется коэффициент фильтрации, определяющий скорость движения воды в бетоне. Принимая, что коэффициент скорости движения воды пропорционален водонепроницаемости, возможно по марке водонепроницаемости назначить соответствующее значение относительного водосодержания X . Математическая зависимость позволяет по значению X перейти на требуемую в этом случае прочность бетона.

Относительное водосодержание цементного теста при $X > 1,3$ не соответствует минимальной марке по водо– непроницаемости W_2 : при значениях $X = 1,3 - 1,2$ соответствующая марка составляет W_2 при $X = 1,1 - W_4$, при $X = 1,05 - W_6$, при $X = 1 - W_8$, при $X = 0,876 - W_{10}$.

Таблица 4.14

Значения коэффициента вида заполнителя/Кз/ ы

Вид заполнителя	Отношение модуля упругости зёрен заполнителя и раствора в бетоне	Коэффициент Кз при предельной крупности зёрен, мм			
		5	10	20	40
Щебень	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	0,95
	3	1	1	0,95	0,90
	4	1	1	0,90	0,85
	5	1	0,95	0,90	0,80
Гравий	-	1	0,95	0,85	0,75

Последовательность выполнения расчета состава бетона состоит в следующем. Основываясь на заданной марке бетона по водонепроницаемости устанавливают соответствующее относительное водосодержание цементного теста X . По выбранному значению X определяется достигаемая при данной структуре прочность бетона и сопоставляется с проектной прочностью R_b . При недостаточной прочности повышается активность цемента до достижения эквивалентности прочностей бетона. Необходимый объем крупного заполнителя зависит от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и находится графическим методом (рис. 4.9). После этого определяется расход крупного заполнителя по массе:

$$K_1 = V_k p_{кв}$$

где V_k – объем крупного заполнителя, m^3 ; $P_{к.в}$ – плотность крупного заполнителя в виброуплотненном состоянии.

Необходимый объем песка в бетонной смеси составляет:

$$V_n = (1 - V_k) + V_k \Pi_k$$

где Π_k – пустотность крупного заполнителя. Расход песка по массе составляет:

$$\Pi_n = V_n p_{пв}$$

где $P_{пв}$ – плотность песка в виброуплотненном состоянии.

Установление расхода цемента может быть выполнено при определении объема пустот в смеси крупного и мелкого заполнителей ($U_{п.см}$), а также суммарной поверхности зерен заполнителя $S_{см}$

$$V_{п.см} = V_n \Pi_n$$

$$S_{см} = S_n + S_k = 16 \Pi_{фп} (P_{2,5} + 2P_{1,2} + 4P_{0,6} + 8P_{0,3} + 16P_{0,14} + 32P_{0,1}) / (P_n + K_1 K_{фк} (P_{40} + 2P_{20} + 4P_{10} + 8P_5) P_k)$$

где S_n – суммарная поверхность песка; S_k – суммарная поверхность крупного заполнителя; $K_{фп}$ и $K_{фк}$ соответственно коэффициенты формы зерен песка и крупного заполнителя; p_n и p_k – средние плотности песка и крупного заполнителя, $кг/м^3$.

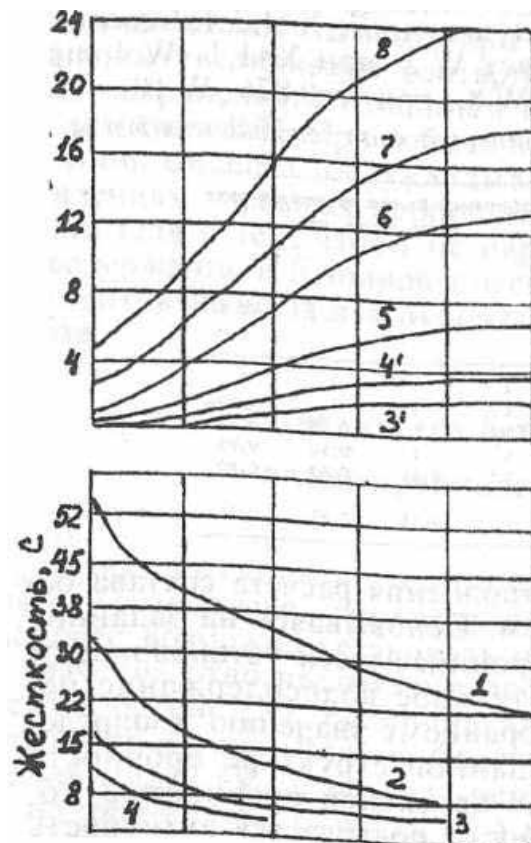


Рис. 4.9. Подвижность ОК и жесткость бетонной смеси в зависимости от водосодержания, X и степени заполнения бетона крупным заполнителем 1 – $X = 0,876$; 2 – $X = 1,00$; 3 – $X = 1,1$; 4 – $X = 1,2$; 5 – $X = 1,3$; 6 – $X = 1,4$; 7 – $X = 1,5$; 8 – $X = 1,65$. Объем крупного заполнителя, m^3

Коэффициент формы зерен имеет значения: для щебня – 1,8–1,9; для гравия речного – 1,5–1,8; для песка горного – 1,7–1,9; для песка речного – 1,3–1,5. Он определяет особенности состава и характер поверхности используемых заполнителей.

Необходимый объем цементного теста (V_t) зависит от объема пустот смеси и связан с толщиной цементных оболочек на зернах крупного и мелкого заполнителей с известной суммарной поверхностью:

$$V_t = (V_{\text{псм}} + t_{\text{об}} S_{\text{см}}) / V_{\text{б}},$$

где $t_{\text{об}}$ – толщина цементных оболочек на зернах заполнителя (принимается равный 0,000013 м); $V_{\text{б}}$ – объем бетона с учетом раздвижки зерен заполнителей цементным тестом, м³; $V_{\text{б}} = 1 + t_{\text{об}} S_{\text{см}}$.

Необходимый расход цемента на приготовление 1 м³ бетонной смеси определяется по формуле:

$$Ц = \frac{1000 V_t}{\phi \cdot \frac{1000 X H \Gamma_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}}}$$

где ϕ – коэффициент контракции по данным табл. 4.14; $H\Gamma$ – водоцементное отношение теста нормальной густоты; $\rho_{\text{ц}}$ – истинная плотность цемента, кг/м³.

Таблица 4.15

Коэффициент контракции цементного теста

Вид цементного теста	Коэффициент при величине относительного водосодержания цементного теста X								
	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,65
Без активации	1,045	1,043	1,038	1,032	1,026	1,019	1,011	1,003	1,00
Механически активированное	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Расход крупного K_1 и мелкого Π_1 заполнителей уточняется в связи с образованием цементных оболочек на поверхности зерен и неизбежной раздвижки $\Pi_1 = \Pi / V_{\text{б}}$; $K_1 = K / V_{\text{б}}$. Уточнение количества крупного и мелкого заполнителей, выполненное на предшествующем этапе позволяет определить водопоглощение заполнителей B_3 .

$$B_3 = 0,0001 (\Pi_1 \Sigma P_{\text{м}} B_{\text{зм}} + K_1 \Sigma P_{\text{кл}} B_{\text{зкл}})$$

где $B_{\text{зм}}$ и $B_{\text{зкл}}$ – значение водопоглощения каждой фракции песка или крупного заполнителя, определяемые по табл. 4.15.

Таблица 4.16

Водопоглощение отдельных фракций заполнителя

Вид заполнителя	Водопоглощение при размере зерен, мм								
	40–20	20–10	10–5	5–2,5	2,5–1,25	1,25–0,63	0,63–0,315	0,315–0,14	Менее 0,14
Песок (речной, морской, горный)	-	-	-	1,6–2,11	1,8–2,3	2,1–2,5	3–4	5–6,5	9–13
Гравий	1,1–1,3	1,2–1,5	1,3–1,6						
Щебень гранитный	0,75	0,95	1,1						

Общее водосодержание определяется как сумма между частью воды, потребляемой заполнителем B_3 , и частью воды, необходимой для цементного теста B_m :

$$B = B_m + B_n \text{ где } B_m = ЦХНГ$$

Методика позволяет при определении расхода основных компонентов учесть одновременно требования по водонепроницаемости и прочности. Полученный ориентировочный состав тяжелого бетона должен быть подвергнут лабораторным испытаниям.

4.8. Структура бетона, твердение и прочность

Структура бетона определяет совокупность отношений, взаимосвязь между отдельными элементами композиционного материала. На уровне макроструктуры он представлен зернами заполнителя, сцементированными вяжущим с включением газовой фазы. Влияющими факторами являются: – величина и форма частиц заполнителя, их поверхность; – соотношение между заполнителем и цементным камнем, образующим матрицу: – форма, размер и количество макропор и дефектов цементной матрицы. Для удобства изучения такая сложная система, как бетон представляется как двухкомпонентная на всех уровнях изучения: макроструктура – щебень и раствор; мезоструктура – песок и вяжущее; микроструктура – частицы вяжущего + вода. На каждом из структурных уровней происходят конструктивные и деструктивные процессы, определенным образом отражающие отдельные свойства бетона. Но это отражение не является до конца полным, так как материальный мир бесконечен. В зависимости от соотношения заполнителя и вяжущего в принятой двухкомпонентной модели выделяется три типа структур: базальная, поровая, контактная, переходящие друг в друга при изменении соотношений между основными составляющими. При базальной структуре частицы заполнителя не имеют контактов между собой. Для данной структуры свойства в основном определяются свойствами цементной матрицы при минимальном влиянии крупного заполнителя. При поровой структуре расстояние между зернами заполнителя уменьшается до тонкой оболочки на его поверхности, тем самым повышается роль заполнителя. В том случае, когда цементного теста достаточно только для покрытия поверхности зерен, заполнители объединяются в систему за счет точечного касания. Особенности протекания химических и физико-химических процессов в дисперсной фазе проявляются в прочности индивидуальных контактов – сил сцепления между отдельными элементами структуры, проявляющимися в обобщающей характеристике – прочности. В зависимости от природы и характера сил, определяющих сцепление частиц, контакты между отдельными частицами дисперсной системы разделяются (рис. 4.10): 1. Каогуляционные с пленочными неводостойкими контактами. 2. Псевдоконденсационные с точечными неводостойкими контактами, не способными противостоять действию воды. 3. Конденсационно-кристаллизационные и конденсационные с фазовыми водостойкими контактами.



Рис. 4.10. Основные типы контактов между частицами в дисперсных системах (по П. А. Ребиндеру)

В каогуляционной структуре частицы взаимодействуют через тонкие прослойки дисперсной среды. Такая структура имеет невысокую прочность и является механически необратимой – может восстанавливаться после механического разрушения. Действуя добавками, в том числе типа ПАВ, становится возможным изменять свойства поверхностей и тем самым благоприятствовать или затруднять формирование структуры, а значит и всего комплекса свойств композиционного материала. Образование точечных контактов между частицами

и химических связей, характерное для псевдоконденсационной структуры, повышает ее прочность. Конденсационная структура формируется за счет срастания частиц и образования химических связей. Для цемента это обеспечивается растворением и последующей кристаллизацией гидратных форм. Свойства такой структуры поддаются регулированию за счет действия добавок ПАВ или электролитов. Для твердеющей бетонной смеси происходит последовательное превращение коагуляционной структуры в конденсационную. Полнота завершенности перехода зависит от внешних технологических факторов и сроков выдерживания. Качество бетона определяется однородностью всех рассматриваемых типов структур. Неоднородность вызывает концентрацию напряжений, приводит к образованию микротрещин, увеличивающихся в числе и размерах под действием эксплуатационных и силовых факторов (рис. 4.11). Поскольку от гидротехнических бетонов требуются повышенные характеристики по водонепроницаемости, морозостойкости, необходимо на этапе приготовления и твердения добиться наибольшей однородности на всех уровнях структур.



Рис. 4.11. Влияние неоднородности на прочность

Важной характеристикой структуры бетона является его пористость, которая определяется особенностями порового пространства затвердевшего цементного камня. Для гидротехнического бетона с нормируемыми величинами проницаемости и морозостойкости поровая структура определяет все особенности и работу бетона в контакте с жидкостью. Бетон является капиллярнопористым материалом, пронизанным разветвленной сетью пор и капилляров различного размера. Причина образования пор представлены в табл. 4.17.

Таблица 4.17

Поры в структуре цементного камня и физико-механические причины их образования

Макропоры		Микропоры	
Крупные радиусом более 10 А	Капиллярные радиусом 10–10 А	Контракционные радиусом 10–10 А	Геля радиусом менее 10 А
Поры между малогидратированными частицами клинкера. Поры от испарения свободной воды		Контракционные поры, поры в кристаллизационной структуре гидратов Микропоры	Поры в геле (преимущественно гидросиликатов кальция)
Поры от недостаточного уплотнения при формировании, вовлеченного воздуха и т.п. Поры между кристаллами гидроксида кальция	Поры в продуктах перекристаллизации кристаллогидратов; микротрещины от внутрискруктурных напряжений		

Получение долговечных бетонов связано с вопросом правильной организации порового пространства. Поры в зависимости от изменения их размеров по – разному взаимодействуют с водой, так как изменяются силы поверхностного взаимодействия в тонких капиллярах и поверхностное натяжение жидкости. Поры с размером менее 10^3 А (табл. 4.17) являются практически непроницаемыми для воды. Вода, находящаяся на поверхности таких пор, имеет специфические свойства и не замерзает при отрицательных температурах. Макропоры и капилляры размером более 10^{15} см становятся доступны для фильтрации воды, поэтому водонепроницаемость зависит от объема и распределения в бетоне макропор и капилляров.

Эта группа пор определяет морозостойкость бетона. Замерзание воды происходит в капиллярных и крупных порах, а контракционные выступают как резервные, так как из пор большего размера при замерзании вода отжимается в эти свободные объемы. Тем самым снижаются внутренние напряжения в бетоне и отдалается момент появления морозных микротрещин. Систему резервных микропор для отжатия воды можно создавать за счет введения поверхностно-активных веществ, морозостойкость бетонов в этом случае повышается. Общий объем пор в бетоне составляет 28–40 %, основная часть которых капиллярные поры. Для получения максимально плотного цементного камня необходимы условия длительного благоприятного твердения (температура выше 0 °С и относительная влажность воздуха не ниже 95 %). Значение В/Ц необходимо понижать, увеличивать степень гидратации цемента, уменьшать воздухововлечение в бетонную смесь, применять химические добавки, уплотняющие структуру бетона (табл. 4.18).

Таблица 4.18

Формулы определения пористости

Вид пористости	Формулы		
	Г.И. Горчаков	А.Е. Шейкин	О.Б. Кунцевич
Капиллярная	$P_k = \frac{\frac{B}{C} - 0,5}{\frac{B}{C} + 0,32}$	$P_k = \frac{\frac{B}{C} - 0,42}{\frac{B}{C} + 0,32}$	$P_k = \frac{\frac{B}{C} - 0,38}{\frac{B}{C} + 0,32}$
Гелевая	$P_g = \frac{0,29}{\frac{B}{C} + 0,32}$	$P_g = \frac{0,19}{\frac{B}{C} + 0,32}$	-
Общая	$P_o = \frac{\frac{B}{C} - 0,21}{\frac{B}{C} + 0,32}$	$P_o = \frac{\frac{B}{C} - 0,23}{\frac{B}{C} + 0,32}$	-

В бетоне как композиционном материале большое значение имеет поверхность контакта между цементным камнем и зернами заполнителя, который не остается инертным по отношению к цементному камню. В условиях щелочной среды твердеющего бетона возможно протекание реакций для большей части заполнителей. Формируется контактная зона, отличающаяся по своему характеру от цементного камня межзернового пространства. Свойства бетона, особенно прочность на растяжение и изгиб, повышаются без изменения расхода цемента.

4.8.1. Прочность бетона

Прочность (R) – способность материала сопротивляться разрушению в процессе его формирования под действием внешней нагрузки. Она характеризуется пределом прочности и является нормируемой величиной. Учитывая многообразие условий работы в конструкциях, материал может испытывать внутренние напряжения сжатия, растяжения, изгиба, кручения. Основным показателем бетона является прочность при сжатии, для специальных видов бетона прочность на растяжение.

Для тяжелых бетонов установлены следующие классы: -по прочности на осевое сжатие: В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В22; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60; -по прочности на осевое растяжение: В0,8; В1,2; В1,5; В2,0; В2,4; В2,8; В3,2. Класс бетона по

прочности на сжатие – нормативное сопротивление осевому сжатию образцов-кубов в МПа с обеспеченностью 0,95. Соотношение между классом бетона по прочности на сжатие и контролируемой на кубах средней прочностью выражается соотношением

$$B = R(1 - 1,64v),$$

где B – показатель класса бетона по прочности на сжатие; R – среднее значение прочности бетона на сжатие. МПа; v – коэффициент вариации, для тяжелого бетона принимают значение 0,135.

До введения в действие СНиП 203.01–84 основной характеристикой прочности бетона принималась марка бетона. Марка бетона определяет прочность при сжатии в кгс/см: образцов-кубов размером ребра 15 см в возрасте 28 суток нормального твердения (ГОСТ 101 SOTS). При определении прочности бетона на любой другой период времени и от начала твердения контролируемую прочность (R_g) можно определить из соотношения

$$R_{28} = R_n \lg 28 / \lg n,$$

где n – фактический возраст бетона в сутках; R_n – прочность в возрасте n суток.

Определение кубиковой прочности позволяет установить призмную прочность бетона (нормативное сопротивление сжатию призм). Испытания бетона могут быть выполнены на кубах с размером граней 7, 10, 15, 20 и 30 см или цилиндрах диаметром 7, 10, 15, 20, 30 см и высотой $2D$ см. После испытания и определения прочности $R_{сж}$ выполняется переход к эталонным образцам с размером граней 15 см. Значение коэффициента перехода представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19

Значение коэффициента перехода

Форма образца	Кубы					Цилиндры			
Размер образца, см	7	10	15	20	30	7x14	10x20	15x30	20x40
Кпр	0,85	0,91	1,00	1,05	1,10	1,16	1,16	1,20	1,24
	0,78	0,88	1,00	1,10	-	0,88	1,13	-	-

При испытании бетонных образцов нагрузка подается непрерывно с постоянной скоростью загрузения 0,6+ – 0,2 МПа/с до наступления момента разрушения. Среднее значение прочности вычисляется как среднее арифметическое в серии испытаний. Время испытания образцов бетона от момента изготовления определяется видом бетона, производственными условиями. Для традиционных тяжелых бетонов возраст испытания равен 28 суткам, для бетона речных сооружений – 180 суток, для бетона морских сооружений – 28 суток. Если по условиям выполнения работ на речных сооружениях требуется ускоренный набор прочности бетона, марка бетона устанавливается на ранних этапах – 28, 60, 90 суток. Возможно определение марочной прочности и на более длинных периодах созревания бетона, если это соответствует действительным срокам выполнения бетонных работ. Тем самым достигается экономичное использование вяжущего в составе бетона. Определение прочности бетона на растяжение при изгибе происходит при загрузении образцов-призм по схеме оболочки двумя сосредоточенными силами с расстоянием, равным 1/2 пролета, (рис. 4.12).

Предел прочности бетона при растяжении на изгиб ($R_{рн}$) – определяется по формуле:

$$R_{рн} = K_b * \frac{P * l}{a * b^2},$$

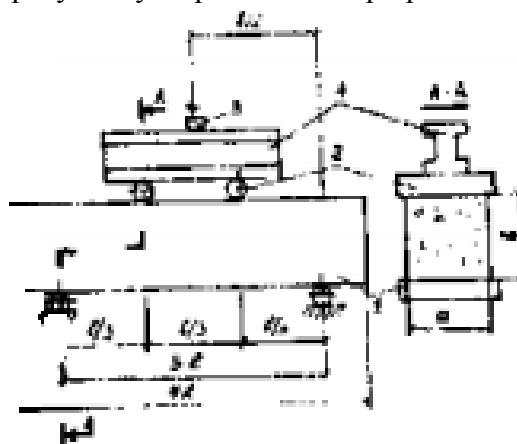


Рис. 4.12. Испытание бетонных призм на изгиб: 1 – опорные катки; 2 – качающийся шарнир; 3 – шаровой шарнир; 4 – траверса

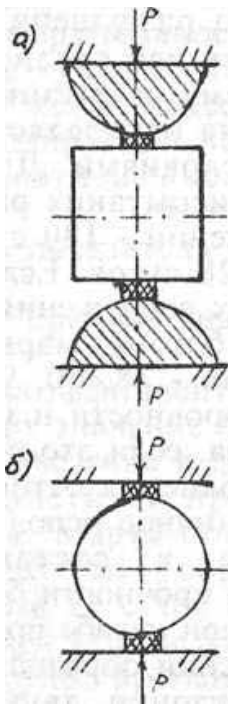


Рис. 4.13. Испытание образцов на растяжение раскалыванием: а – на образцах-кубах, б – на образцах – цилиндрах; 1 – цилиндрическая опора, 1 – прокладка

где K_6 – масштабный коэффициент прочности бетона в образцах базового размера: 1 – расстояние между опорами, см; а и в – ширина и высота образца-призмы, см. Базовый размер образцов для выполнения испытания составляет 15 x 15 x 60 см.

Прочность тяжелого бетона при растяжении определяется методом раскалывания образцов кубов или образцов-цилиндров (рис. 4.13).

Раскалывание выполняют установкой образцов на цилиндрические опоры диаметром (150 ± 10) мм и длиной не менее длины грани образца. Непосредственно между образцами и плитой прессы размещаются прокладки из трехслойной фанеры. Скорость приложения на грузки составляет $(0,05 + - 0,02)$ МПа в секунду. Предел прочности на растяжение при раскалывании определяется по формуле:

$$R_{pp} = 0,02 K_{pp} \cdot \frac{P}{AT},$$

где K_{pp} – масштабный коэффициент прочности бетона в образцах-эталонах (табл. 4.19), А – прочность рабочего сечения образца, см³

Представленные методы испытаний проводятся без непосредственной связи условий изготовления и хранения образцов с бетоном конструкции. Для изучения результатов характеризующих прочность гидротехнического бетона в реальном сооружении испытываются керны. Размеры высверливаемых образцов составляют $H = (1,25 - 2,5)$ Д и $D = 110 - 150$ мм. Керны после высверливания хранятся укрытые влажной материей и испытываются в возможно более сжатые сроки. Неровные основания кернов обрабатываются по одному из предложенных способов: – торцевые поверхности кернов выравниваются с помощью цементно-песчанного раствора состава 1 : 2 или 1 : 2,5. Образцы выдерживаются 5 суток в нормальных условиях, после чего торцы шлифуются и керны считаются подготовленными к испытаниям; керны не проходят предварительной обработки. Применение песка и двух стальных стаканов устраняют операцию выравнивания торцов. Песок засыпается в стакан, после чего устанавливается керн. Подобная операция выполняется для верхней грани керна: – торцы керна обрезают камнерезным станком и шлифуются. Подготовленные керны проходят испытания по определению прочности при сжатии. Результаты обрабатываются с использованием коэффициента приведения прочности:

$$K_{np} = 1,37/K_1,$$

где K_1 – определяемый коэффициент для каждого керна.

$$K_1 = (n - 20/n - 0,43) - 0,030,$$

где $n = H/D$; H – высота керна, см; D – диаметр керна, см

Приведённая прочность кернов составляет $R_{np} = K_{np} R$

Окончательным этапом обработки является определение кубиковой прочности бетона на сжатие: $R_{сж} = 1,11 K_{np}$

4.8.2. Определение прочности бетона в изделиях и конструкциях

Определение прочности бетона испытанием стандартных образцов не позволяет с полной мерой надежности характеризовать прочность бетона в реальной конструкции и наблюдать за ее изменением в течение времени. Для этих целей разработаны методы и приборы контроля прочности бетона без его разрушения с использованием различных физических методов.

Наиболее распространенным является метод пластических деформаций. Прочность бетона определяется по размерам получаемых отпечатков на бетонной поверхности при погружении индентора (твердой части прибора), характеризующих пластическую деформацию бетона. Вдавливание выполняется статической нагрузкой под действием прессы или динамической нагрузкой в виде удара, свободного падения маятника, выстрела. Приборами оперативного контроля, использующими этот принцип, являются эталонный молоток Н. П. Кашкарова и приборы ДПГ-4 и КН. Молоток Н. П. Кашкарова (рис. 4.14) позволяет определить прочность бетона в изделиях и конструкциях в диапазоне 5–50 МПа. Прочность на сжатие устанавливается через ее зависимость от ударной твердости. По контролируемой поверхности бетона наносится удар, оставляющий два отпечатка: на поверхности бетона и цилиндрической поверхности эталона – прутка стали марки ВСтЗсп2 или ВСтЗпс2. Косвенным показателем прочности является отношение диаметра отпечатка на бетоне d_5 к диаметру отпечатка на эталоне d_3 . Предел прочности бетона на сжатие в изделии находится по тарировочному графику « $R_{сж} - d_5/d_3$ » в зависимости от величины d_5/d_3 (рис. 4.15). Маятниковый прибор ДПГ-4 определяет прочность бетона в диапазоне 5–50 МПа (рис. 4.16). Основным элементом является диск, которым в свободном падении на испытываемую поверхность бетона наносится удар. Прочность бетона определяется в зависимости от величины получаемого отпечатка. Возможно определение прочности как в горизонтальном, так и наклонном положении. Прочность бетона определяется по формуле: $R_b = A H / a^3_{ср} \cdot 1$, где A – коэффициент дискового прибора, определяемый экспериментально; H – высота падения диска, см; 1 – длина стержня прибора, см; a – величина отпечатка на бетоне, см.

Пружинный прибор КМ применяется для определения прочности бетона в интервале 5–50 МПа (рис. 4.17). В основу действия прибора заложены методы упругого отскока, упругих и пластических деформаций. Из вертикального положения на контролируемый участок бетона наносится серия ударов (не менее 5). Для повышения точности измерений расстояние между отпечатками должно составлять не менее 30 мм. При работе прибора в режиме отскока определяется высота подъема ударника после каждого удара по показаниям шкалы прибора. При работе по методу пластических деформаций после удара измеряется диаметр отпечатка.

Прибор имеет сменный ударник с шариковым наконечником для работы методом пластических деформаций. После проведения серии измерений определяется среднее значение, частные значения не должны отклоняться от среднего более чем на 20%, в противном случае они отбрасываются и измерения повторяются. Заключение о прочности бетона на сжатие выполняется по градуированной кривой прибора. Оперативным методом контроля прочности бетона является ультразвуковой метод, применяемый для тяжелых, ячеистых и плотных силикатных бетонов, а также для легких. Испытания заключаются в измерениях времени прохождения ультразвука и базы прозвучива-

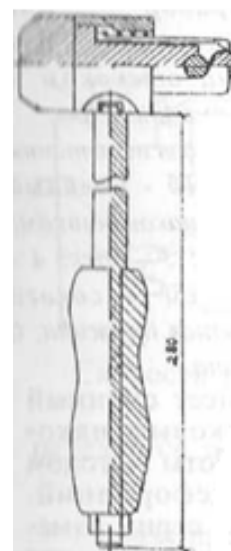


Рис. 4.14. Эталонный молоток Н. П. Кашкарова: 1 – индентор {шарик}; 2 – эталонный стержень; 3 – стакан; 4 – пружина; 5 – корпус; 6 – головка

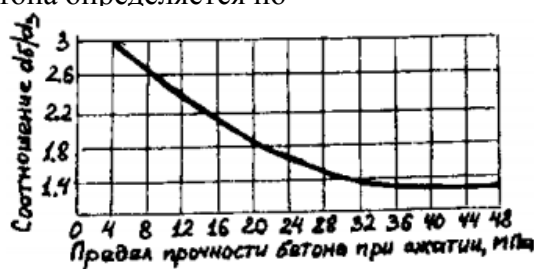


Рис. 4.15. Тарировочный график определения прочности бетонов молотком И. П. Кашкарова

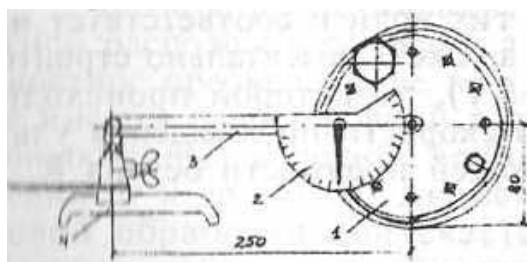


Рис. 4.16. Маятниковый прибор ДПГ-4 1 – диск; 2 – угломерная шкала; 3 – стержень; 4 – подножка

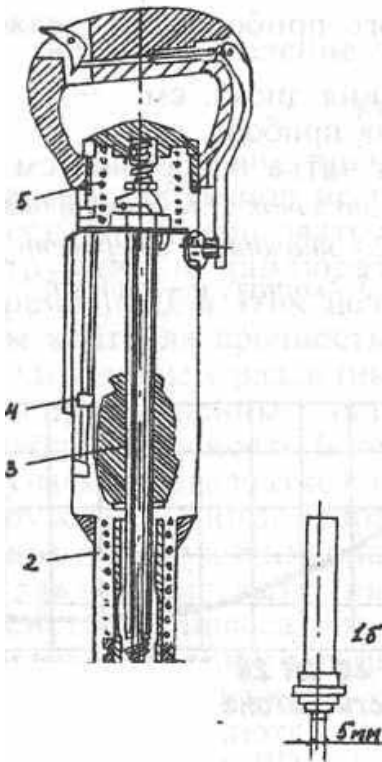


Рис. 4.17. Прибор КМ (комплексного метода) для испытания бетона отскоком и пластических деформаций: 1а – сменный ударник для испытания методом отскока; 1б – сменный ударник с шариковым наконечником; 2 – ударная пружина; 3 – боек; 4 – шкала с указателем высокого отскока; 5 – возвратная пружина; б – поверхность бетона

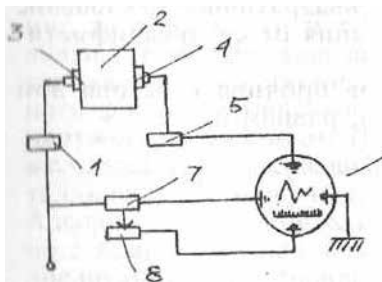


Рис. 4.18. Схема ультразвукового импульсного прибора УКБ-11 – генератор ультразвуковых импульсов; 2 – образец; 3 – излучатель; 4 – приемник; 5 – усилитель; 6 – электронно-лучевая трубка; 7 – электронное устройство; 8 – генератор отсчетов времени

Результатом взаимодействия с внешней средой является величина и изменение самой величины как пористости, так и удельной поверхности цементного камня. Взаимная связь этих двух показателей позволяет прогнозировать стойкость и долговечность цементных

ния. По измеренным величинам рассчитывается V_v – скорость распространения упругой волны, по которой графически устанавливается прочность бетона. Изменение плотности бетона проявляется в изменении распространения упругих волн и соответствует изменениям прочности бетона. Экспериментально строится тарировочная кривая $R_b = f(V)$, по которой происходит сопоставление измеренной скорости прохождения ультразвука V_v и соответствующей прочности бетона R .

Скорость распространения ультразвуковой волны определяется по формуле: $V_y = \frac{1}{t_y} \times 1000$, где 1 – база прозвучивания, мм; t_y – продолжительность распространения упругой волны в бетоне, мкс. Время (t , мкс) распространения ультразвуковых волн может измеряться как сквозным, так и поверхностным прозвучиванием (рис. 4.19).

Сквозное прозвучивание выполняется как при соосном расположении щупов, так и диагональном. Поверхностное прозвучивание выполняют в том случае, когда имеется односторонний доступ к поверхности или для тонкостенных изделий. Температура выполнения измерения от 0 до +5 °С, для бетонных изделий после тепловой обработки допускается температура до 65 °С. Важным показателем качества бетона является его однородность. Для гидротехнических бетонов однородность считается хорошей, если коэффициент вариации C_v не превышает 15 % и удовлетворительной – при C_v менее 20 %: $C_v = S/R_{cp}$, где S – среднеквадратичное отклонение отдельных результатов испытания от среднеарифметической прочности бетона; R_{cp} – среднеарифметическая прочность бетона при числе образцов бетона в серии, равном n .

$$S = \sqrt{\frac{(R - R_{cp})^2}{n - 1}}$$

4.9. Стойкость бетона к действию климатических эксплуатационных факторов

Вопросы надежности и долговечности бетона в условиях реальной эксплуатации являются определяющими. ими занимаются большие коллективы ученых как в нашей стране, так и за рубежом. Прогнозирование основных физико-технических свойств возможно при правильном определении параметров, определяющих основные свойства цементного камня и бетона на его основе. Цементный камень представляет систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной форм. Твердая фаза включает продукты гидратации клинкерных минералов и продукты вторичного взаимодействия среды и новообразований. Пространственное расположение этих фаз является фактором, определяющим основные свойства цементного камня.

бетонов. Требуются знания геометрии пор и физико-химических свойств пористого тела, каковым является цементный камень. Его поры состоят из капилляров переменного сечения с радиусом от нескольких миллиметров до долей мм. В процессе формирования твердого цементного камня, а затем и в процессе эксплуатации происходят изменения и другие свойства бетона. Отрицательное влияние на прочность и другие механические свойства (понижение твердости, увеличение хрупкости и, как следствие, снижение долговечности и т.д.) оказывает взаимодействие влаги с поверхностью цементного камня. Явление адсорбционного понижения прочности вследствие переменного физико-химического воздействия среды было обнаружено академиком П. А. Ребиндером. Это явление «изучалось и подтверждено на многих моно и поликристаллических, аморфных, пористых и сплошных телах. Адсорбционное понижение прочности таких тел связано с возникновением микротрещин в области скопления дислокации при одновременном росте имеющихся трещин. Напряжения перераспределяются на бездефектные зоны (в смысле отсутствия трещин) при достижении напряжениями критических значений, происходит разрушение материала в этой зоне. В бетоне, как капиллярнопористом теле, на стенках капилляров имеется адсорбционная жидкость, обладающая специфическими свойствами. Академик Б. В. Дерягин обнаружил расклинивающее давление в граничных слоях жидкости, которое обусловлено электростатическими и межмолекулярными взаимодействиями граничных слоев (рис. 4.20). Величина давления зависит от природы взаимодействующих фаз, температуры и толщины пленки. Проявление этого дефекта влияет на развитие трещины в структуре цементных бетонов. Возникающие собственные напряжения приводят к разрушению кристаллического каркаса в тех местах, где он уже сформировался. При наличии связей, ограничивающих деформацию системы, наблюдается ее уплотнение и рост давления на связи, а при их разрыве происходит снижение прочности материала. Деструкция и разрушение капиллярно-пористых материалов определяется многими факторами, которые взаимодействуют друг с другом. К ним относятся кристаллизационные, капиллярно-адсорбционные, осмотические и другие явления. Помимо этого в условиях эксплуатации процесс разрушения усугубляется воздействиями механического и термического происхождения. Изменение свойств под действием этих факторов с течением времени приводит к старению материала

Долговечность – способность материала сопротивляться механическим воздействиям в сочетании с действием атмосферных факторов: изменением температуры, попеременному увлажнению-высушиванию, замораживанию и оттаиванию, солнечной радиации, воздействию солей и т.д. При рассмотрении особенностей применения гидротехнических бетонов основными факторами воздействия являются: водонепроницаемость, морозостойкость, трещиностойкость и т.д. Водонепроницаемость является наиболее распространенной характеристикой проницаемости бетона (ГОСТ 12730.5–78). Для всех видов бетона водонепроницаемость определяется наибольшим давлением воды, при котором не наблюдается просачивание жидкости через цилиндрические образцы диаметром и высотой 15 см. Испытание проводится в установке,* в которой цилиндрическая поверхность образцов изолируется, а к нижней

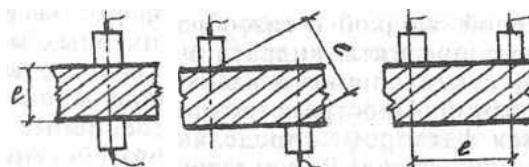


Рис. 4.19. Схема распространения звуков для прозвучивания бетона ($l = 150\text{--}400\text{ мм}$)

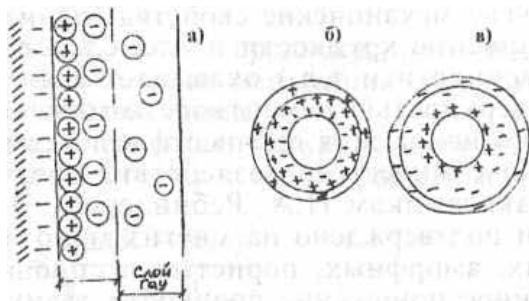


Рис. 4.20. Строение двойного электрического слоя: а – распределение зарядов у твердой поверхности частиц (пунктиры обозначают условные границы между обеими частицами двойного электрического слоя, ДЭС); б – схематическое изображение мицеллы с отрицательно заряженной частицей; в – то же, с положительно заряженной частицей

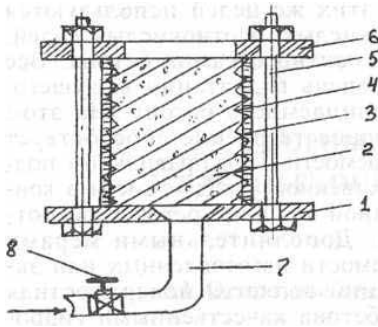


Рис. 4.21. Схема установки для испытания бетона на водонепроницаемость.

1 – нижняя шайба; 2 – образец бетона; 3 – стальное кольцо; 4 – резиновое кольцо; 5 – стальной болт; 6 – верхняя шайба; 7 – трубопровод подвода воды; 8 – вентиль

поверхности образца подводится вода (рис. 4.21). Испытание начинается при давлении воды 0,1 МПа, при котором образец выдерживается 8 часов, после чего давление повышается на 0,1 МПа через каждые 8 часов. Испытание проводится на изолированных шести образцах, укрепленных в установке. Давление воды создают подводом азота и контролируют манометром.

За марку принимается наименьшее давление, при котором на четырех из шести образцов не появится мокрых пятен на верхней торцевой поверхности. Предусмотрены марки по водонепроницаемости. Для гидротехнических бетонов эта марка по водонепроницаемости назначается исходя из особенностей службы бетона и напорного градиента (для тяжелого бетона – W2, W4, W6, W8, W10, W12). Напорный градиент определяется отношением максимального напора воды к толщине всей конструкции или ее наружной зоны. Для конструкций, работающих без напора воды, принимается минимальная марка W2, при значении градиента до 5 – водонепроницаемость устанавливается равной W4, при значениях от 5 до 10 – W6, от 10 до 12 – W8, от 12 и более – W12. В зависимости от условий возможно дальнейшее повышение марки по водонепроницаемости. Проницаемость бетона зависит от объема, взаимной сообщаемости размеров макропор, что зависит от установленного отношения В/Ц бетона, так как он прямо пропорционален объему воды затворения, введенного в бетонную смесь сверх необходимого количества для гидратации. Наиболее вероятными путями фильтрации воды является также верхняя зона контакта растворной части с зернами крупного заполнителя. Более плотная структура достигается при использовании расширяющегося и глиноземистого цементов. Введение тонкомолотых активных минеральных добавок, повышение степени уплотнения повышает водонепроницаемость бетона. Снижение расхода воды за счет введения добавок ПАВ или использование пластифицированных и гидрофобных бетонов увеличивает водонепроницаемость. Для этих же целей используются добавки хлористых, сернокислых, азотнокислых солей, колюматирующих поры цементного камня бетона. Все факторы, повышающие степень гидратации вяжущего, увеличивают водонепроницаемость бетона. На этом основании длительное водное твердение способствует повышению водонепроницаемости. При правильном подборе состава бетона и качественной укладки смеси в конструкцию при ее достаточной толщине бетоны являются водонепроницаемыми. Дополнительными мерами увеличения водонепроницаемости изготовленных или эксплуатируемых конструкций является поверхностная обработка или покрытие бетона качественными гидроизоляционными материалами.

5. СБОРНЫЕ БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

5.1. Основные сведения о железобетоне

Использование сборного железобетона позволяет упростить технологию и добиться сокращения сроков строительства гидротехнических объектов. Из опыта Свирьстроя и Днепростроя применение сборного железобетона обеспечивает непрерывность возведения и высокие темпы работ за счет выполнения значительной части за пределами площадки, ограниченной контуром сооружений. Совместно применяются сборные железобетонные плиты-оболочки и монолитный бетон как между блоками бетонирования, так и по границам секций. При таком способе возведения фундаментных плит зданий, сооружений это дает возможность производить укладку бетонной смеси по всему фронту, бетонируя один блок за другим. Применение сборного железобетона эффективно в мостах, электрических распределительных устройствах, каркасе зданий электростанций. Особенно эффективно применение сборного железобетона на небольших гидроузлах (рис. 5.1).

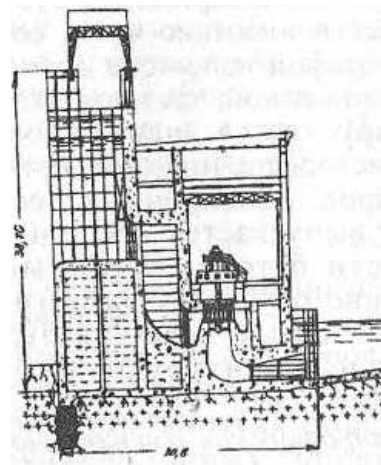


Рис 5.1. Здание гидроэлектростанций ячеистого типа из сборных железобетонных конструкции

При монолитном бетоне в здание гидроэлектростанции необходимо было бы уложить 19 тыс. м³ бетона, а по варианту сборного строительства уложено 9,6 тыс. м³ конструкций из бетона, из которых на сборный железобетон приходится 5,6 тыс. м³, а на омоноличивание 4,0 тыс. м³. Зачастую в контрфорсных плотинах для напорной грани применяют специальные бетонные блоки, которые выполняются из бетона повышенного качества. В Шотландии в 1953 г. была построена контрфорсная плотина Лох-Лон высотой 49 м (рис. 5.2). Водосливная грань плотины была выполнена из сборных железобетонных балок уголкового сечения. Швы в стыках балок заделаны раствором. Применяются сборные железобетонные плиты оболочки при возведении стенок камеры шлюза. В гидротехническом строительстве предварительное обжатие бетона в стенках шлюза, бетонных плотинах применяется довольно редко из-за сложности производства работ. Однако такие примеры есть. Можно назвать плотину Братской ГЭС, где бетон в двух блоках со стороны напорной грани обжат стальными тросами с помощью домкратов. Необходимо привести метод гравитационного напряжения арматуры, предложенный проф. А. З. Басевичем, в котором в качестве натягивающей силы используется собственный вес отдельных частей сооружений (рис. 5.3). Применяя этот метод, в начале необходимо возвести нижнюю часть сооружения у напорной грани которой заложена арматура 2, выпущенная вверх над уложенной частью бетона. Верхняя часть 3 бетонируется в наклонном положении. Начальное положение обеспечивается применением металлических цилиндров, наполненных песком, который выпускается после набора прочности бетона. Бетонный блок, постепенно опускаясь, растягивает арматуру. После чего заделывают штрабы и цементируют строительные швы.

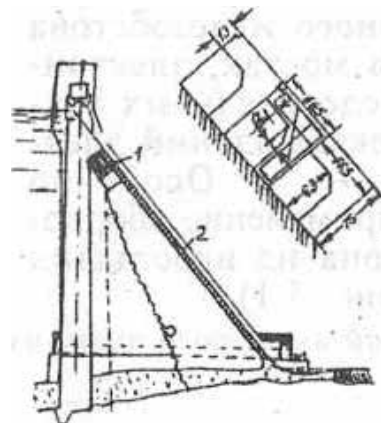


Рис. 5.2. Контрфорсная плотина Лох-Лон (Шотландия) из сборных железобетонных конструкций

1 – сборный свод; 2 – Материалы для сборного железобетона железобетонные блоки водослива; 3 – поперечное сечение балок водос. шва

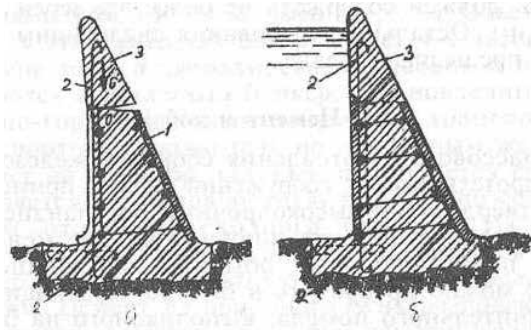


Рис. 5.3. Схема возведения железобетонной плотины с арматурой, напряженной «гравитационным методом» (предложение проф. Л.З. Басевича)

1 – подпорная стенка; 2 – арматура; 3 – верхняя часть плотины (бетонный блок)

20–40 мм. Прочность крупного заполнителя определяется отпускной прочностью железобетонных сборных изделий из известных видов крупного заполнителя, наиболее эффективным из которых для бетона повышенной прочности является гранитный щебень. Прочность щебня должна быть в два раза выше отпускной прочности бетона. Применение гравия для изготовления высокопрочных железобетонных изделий не целесообразно. Песок, который используется для бетонных смесей, идущих на изготовление сборного железобетона, должен содержать не более 5% зерен крупностью 5 мм. Остальные требования аналогичны отмеченным в предыдущей главе.

5.2.2. Цемент и добавки

Для массового изготовления сборного железобетона для гидротехнических сооружений должен применяться быстротвердеющий высокопрочный портландцемент. Прочность такого цемента должна быть не менее 30 МПа. Как показывает опыт, обычный портландцемент марки 400 можно превратить в быстротвердеющий путем дополнительного помола, выполняемого на бетонных заводах. При достаточно высокой тонкости помола цемента целесообразно добавлять к нему гипс, оптимальная дозировка которого устанавливается опытным путем (обычно применяется 3–4% гипса). На гидротехнических объектах зачастую используют полигонные условия производства железобетона и быстротвердеющих бетонных смесей. Имеются два способа получения быстротвердеющего бетона: а) на основе применения быстротвердеющего цемента со специальным минералогическим составом и повышенной тонкостью помола; б) введением в бетон, приготовленный на обычном портландцементе, химических добавок-ускорителей (например, хлористый кальций от 3 до 5,5%, двуводный гипс 3–7% от веса цемента).

5.3. Применение сухих смесей в строительстве

Последние десятилетия в целях обеспечения высокого уровня и стабильности качества, повышения производительности труда, оптимизации затрат на транспортировку и эффективного использования стройматериалов наметилось широкое внедрение сухих строительных смесей. Применение сухих смесей способствует сокращению сроков и стоимости работ, позволяет внедрять новые технологические процессы и материалы, повышая культуру производства, эффективно используя средства малой механизации. Совершенствование качества сухих строительных смесей идет в направлении их модифицирования путем введения различных добавок и компонентов, придающих определенные качественные показатели.

Целесообразность использования сухих смесей подтверждена зарубежной и Российской строительной практикой. Они применяются при выполнении отделочных и монтажных операций, при производстве бетонных, штукатурных, кладочных, плиточных работ, устройстве покрытий полов и заделке стыков. Кроме этого, отечественными и зарубежными производителями осуществляется выпуск сухих растворных смесей для декоративных и облицовочных работ с разнообразной цветовой гаммой.

Сухие смеси имеют ряд преимуществ:

Получение строительных растворов при минимальной затрате трудовых и временных ресурсов, практически необходимо затворение водой и перемешивание;

Экономия дорогостоящих компонентов (минеральных вяжущих): гипса, извести, цемента за счет рационально подобранных составов, пластифицирования смеси и придания вододерживающей способности получаемым растворам;

Круглогодичное использование растворных смесей, как при отрицательных, так и при положительных температурах, а это очень важно для сибирских климатических условий;

Снижение нерациональных отходов растворов на 5–10 % в результате приготовления строго заданного объема смеси в соответствии с предполагаемым проектным решением или заданием;

Стабильность качественных показателей получаемых растворов в результате ранее установленной дозировки основных компонентов и добавок направленного действия, независимая от технологии перемешивания;

Снижение транспортных расходов и повышение производительности труда строительных рабочих на 15–25 %, за счет постоянного максимального использования свежеприготовленных строительных растворов, обладающих улучшенными пластическими свойствами;

Улучшение качества выполняемых строительных и монтажных работ при некотором снижении трудоемкости технологических процессов.

5.4. Виды сухих смесей и растворов

Ассортимент сухих строительных смесей, выпускаемых предприятиями промышленности строительных материалов, довольно обширен и представлен следующими видами (рис. 5.4):

строительные (пескобетоны М 100, 200, 300; кладочные М 75, 50; штукатурные М 25, 10); клеевые (для проведения работ с искусственными и природными материалами);

декоративные – для цветной отделки фасадов, обладающие повышенной водостойкостью; герметизирующие (фуговочные) – для затирки швов между плитками; шпаклевочные – цветные шпаклевки;

специальные – с повышенной сопротивляемостью к огневым воздействиям; теплоизоляционные – штукатурки и кладочные растворы с теплоизоляционным заполнителем (наполнителем);

наливные для устройства самовыравнивающихся полов с вододерживающими, водоотталкивающими и герметизирующими свойствами.

Сухие смеси в зависимости от используемых компонентов делятся по видам добавок:

- обычные растворы (глины, ЛСТМ и т.д.);
- с полимерными композициями и добавками;
- с диспергируемыми порошками, например, на основе КМЦ по технологии ИХ-ТИМС;
- с продуктами переработки целлюлозы и др.

В зависимости от вида вяжущего материала сухие строительные смеси и составы можно разделить простые (с использованием одного вида вяжущего) и сложные или комбинированные на смешанных вяжущих, например, цементно-известковые, известково-зольные, известково-гипсовые и др.

При этом сухие смеси можно разделить по группам:

- цементно-песчаные смеси;
- цементно-известково-песчаные;
- известковые;
- гипсовые смеси.

По способу применения подразделяются на ручные и механического применения.

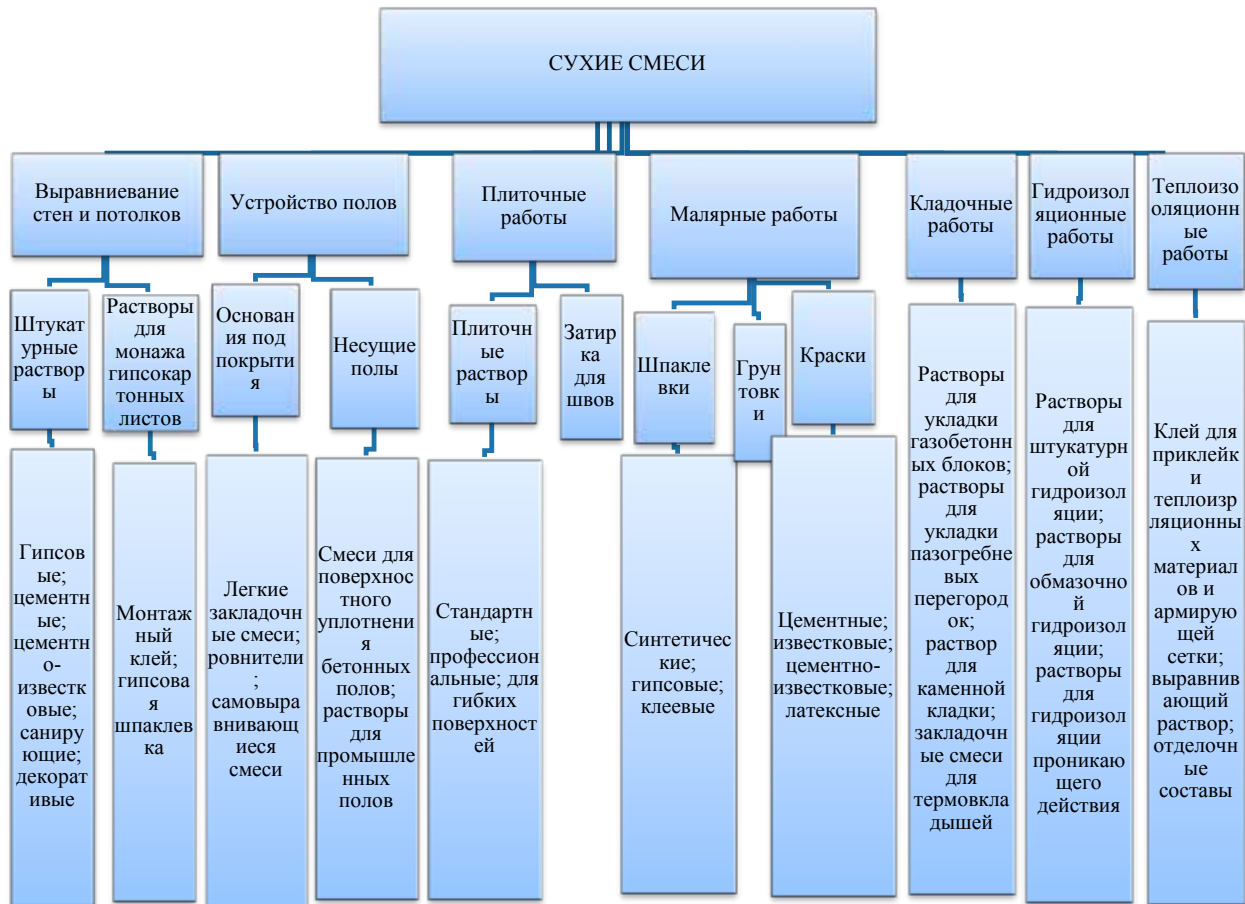


Рис. 5.4. Направления применения сухих смесей в строительстве

Для производства отделочных работ применяют декоративные сухие смеси, используя для этих целей цветные цементы или вводя в них различные по цвету пигменты. Такие штукатурки используются при производстве фасадных и внутренних работ. Выбор вариантов сухих смесей, используемых в штукатурных работах, зависит от условий эксплуатации зданий и сооружений.

Шпатлевочные составы служат для заполнения мелких пор и раковин, выравнивания поверхностей, которые предназначены под покраску или оклейку обоями, для ремонта поврежденных поверхностей. Рецептура таких материалов должна быть подобрана таким образом, чтобы обеспечивались:

- устойчивость к усадке;
- технологичность;
- повышенная адгезионная способность.

Смеси для устройства пола должны отвечать жестким требованиям. Для этих целей используют растворы с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам, масло- и кислотоустойкостью, а также стойкостью к истиранию и другим механическим нагрузкам.

Составы для гидроизоляционных покрытий предназначены для внутренней изоляции подвалов, ванн и других сооружений, эксплуатируемых при гидростатическом давлении.

Такие смеси получают путем введения в них различного рода добавок, придающих им эластичные свойства.

Материалы для наружных работ должны быть визуально привлекательными (декоративными) и защищать материал стены, находящейся под штукатуркой. В отвержденном состоянии штукатурки должны иметь:

- хорошую адгезию к основе;
- низкое водопоглощение и обладать водоотталкивающим эффектом;
- способность к самовысыханию после увлажнения;
- минимальную склонность к образованию трещин;
- малый модуль упругости.

В качестве отделочных материалов для производства строительных работ применяются составы на основе сухих смесей с введением в них полимерных композиций, повышающих физико-технические свойства покрытий. К таким отделочным материалам можно отнести различного рода жесткие сухие строительные смеси, шпатлевки, фасадные смеси, герметизирующие шламы.

Для отделочных наружных работ стен зданий, выполненных из керамического кирпича и других природных и искусственных каменных материалов, а также для защиты стен от атмосферных воздействий различного вида могут быть использованы следующие способы: оштукатуривание известковыми, цементными или смешанными растворами для последующей окраски или офактуривание покрытиями из декоративных или стандартных штукатурных составов.

Твердение известковых растворов на каменном или бетонном основании происходит за счет карбонизации при воздействии диоксида углерода. Смешанные известково-цементные растворы твердеют за счет гидратации цемента в период влажного состояния, а также в результате карбонизации. Чем больше цемента в растворе, тем в меньшие сроки отмечается набор прочности и затвердевший штукатурный состав достигает заданную прочность.

Составы штукатурных растворов устанавливаются с учетом в зависимости от их назначения и условий эксплуатации строящихся или ремонтируемых объектов. Подвижность штукатурных растворов и предельная крупность заполнителя выбирается в зависимости от назначения и варьирует для каждого слоя в соответствии с видом основания.

Для повышения подвижности растворов вводят различные гидрофобно-пластифицирующие добавки.

Декоративные (отделочные) растворы изготавливают на белом, цветном и обычном портландцементе. Заполнителем служит обычный речной песок, или предварительно дробленые пески из белого известняка, мрамора и т.п. Отделка лицевой поверхности панелей наружных стен осуществляется строительным раствором марки 50 (для легких бетонов), а для железобетонных изделий – марки 150 с морозостойкостью не ниже F 35.

5.5. Минеральные компоненты сухих строительных смесей

Используемые при производстве сухих смесей материалы весьма разнообразны по номенклатуре и свойствам, они придают готовым сухим смесям и растворам определенные свойства.

Материалы могут быть объединены в следующие группы:

- минеральные вяжущие;
- наполнители и заполнители;
- добавки-модификаторы различного назначения;
- пигменты – органические и неорганические;
- регуляторы схватывания – ускорители и замедлители.

Как правило, в производстве сухих смесей используют сырьевые материалы в порошкообразном состоянии различной дисперсности. Для изготовления отдельных видов сухих смесей применяют волокнистые материалы с определенной длиной волокон, а также наполнитель с размером зерен 3...10 мм. Для производства сухих строительных смесей целесообразно применять материалы, взятые у поставщиков сырья, территориально примыкающих к месту их производства.

Цемент. Для получения сухих смесей и растворов предусматривается применение цементного клинкера или цемента. В случае применения цементного клинкера производится совместный помол с песком в шаровых мельницах с последующим смешением их с наполнителями и присадками. Для производства сухих смесей используют цементы различного химико-минералогического состава, но предпочтение отдается портландцементу. Критерием выбора цемента являются: тонкость помола, сроки схватывания, водопотребность и активность, но основное условие его выбора определено назначением и условиями эксплуатации материалов, изготавливаемые на данном цементе.

Цементы применяют в различных по назначению смесях, белый и цветные используют в основном в декоративных бетонах и растворах, а также в финишных шпатлевках, предназначенных для наружных и внутренних работ. Иногда в некоторых смесях могут быть использованы разновидности портландцемента или смеси различных минеральных вяжущих. Например, глиноземистый цемент может быть использован в качестве минеральной добавки, способной корректировать отдельные свойства не только растворной смеси, но и затвердевшего раствора.

К материалам для тонкослойного нанесения предъявляются повышенные требования по усадке, трещиностойкости и стойкости при воздействии внешних физических и климатических факторов. В этом случае целесообразно применение бездобавочных алитовых портландцементов, так как наличие в них минеральных добавок в виде золы и шлаков оказывает существенное влияние на химический и минералогический состав минерального вяжущего и продуктов твердения цемента.

Требования к гранулометрическому составу цемента для сухих строительных смесей в целом не отличаются от требований к цементам, используемым в бетонах с пониженным временем твердения.

Гипсовые вяжущие. Для регулирования сроков схватывания в составе сухих строительных смесей на основе цемента, часто используется строительный гипс. Строительный гипс, состоящий из полугидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) – порошкообразный материал, обладающий высокоразвитой внутренней поверхностью, что обуславливает высокую реакционную способность минерального вяжущего. Такая структура характерна для β – полугидрата, отличительной особенностью которого является повышенная водопотребность при смешивании с водой. Водопотребность обычно составляет 50...70%. Это вяжущее является быстросхватывающимся, со сроками твердения от 2 до 30 мин.

Заполнители и наполнители. Роль заполнителей и наполнителей в твердеющей смеси весьма велика. Структурно-технические свойства растворов и бетонов во многом зависят от оптимального содержания сырьевых материалов, входящих в состав сухих строительных смесей. Количество их в составе сухих смесей должно быть таковым, чтобы формировать скелет основного материала – бетона или раствора, кроме того сокращать расход вяжущего, уменьшать усадочные деформации [4–10]. В качестве заполнителей для тяжелых бетонов используются щебень или гравий фракции более 3 мм из прочных горных пород, а для легких бетонов – заполнители из пористых горных пород или искусственные пористые заполнители: керамзитовый и аглопоритовый гравий, аглопоритовый щебень, вспученный перлит, вермикулит, щебень из шлаковой пемзы и др. Мелкий заполнитель представляет обычно природные или искусственные материалы с размером зерен от 0,16 до 5 мм. В сухих

смесях чаще всего используются кварцевые пески различных месторождений, отвечающие требованиям ГОСТ 8736–93.

Гранулометрический состав заполнителей необходимо подбирать таким образом, чтобы получилась максимальная плотность упаковки зерен. Это достигается при использовании более двух фракций, с определённой пропорцией зёрен разных диаметров.

Выполнение таких условий возможно, если песок перед загрузкой в расходные бункера предварительно высушен и разделен на фракции требуемых расчетных размеров. Обязательным должен быть контроль влажности песка и других добавок и наполнителей, не превышающий 0,1 %. Наличие примесей в песке должно удовлетворять требованиям СНиП.

В качестве наполнителей для сухих смесей используют также тонкомолотые зернистые материалы в виде каменной муки с размером частиц менее 0,15 мм минерального происхождения, к которым относятся мраморная, известняковая и доломитовая мука, молотые кварцевые пески, мел, шлаки, золы, отходы обогащения при добыче редкоземельных металлов. Для финишных шпатлевок и затирок тонкомолотые зернистые наполнители могут быть основным компонентом. Различные разработчики и предприятия рекомендуют использовать для производства сухих строительных смесей молотые минеральные наполнители: керамзит, маршаллит, пылевидный кварц, пески, шлак, стеклоотходы и другие отходы, в т. ч. образующиеся при разработке месторождений для стекольного производства и добычи редкоземельных металлов.

Карбонатные материалы. В сухие смеси для улучшения технологических свойств вводят карбонатные материалы, которые могут играть роль, как заполнителей, так и наполнителей. При этом можно получать высокие прочностные характеристики растворов составов, так как данные материалы имеют относительно большую удельную поверхность с размером частиц наполнителей до 150 мкм.

При выборе оптимальной дисперсности наполнителей, особенно используемых для выравнивающих и финишных отделочных составов, необходимо учитывать следующие свойства минерального сырья и его технологические особенности. Важными являются: способность частиц к агломерации, возрастающая при увеличении удельной поверхности наполнителей; седиментация частиц, ускоряющаяся с уменьшением удельной поверхности и повышением плотности смесей. В качестве наполнителей рекомендуется применять известняковую муку, имеющую некоторые преимущества перед мраморной, доломитовой мукой и мелом (имеет средне-объемный размер частиц равный 15,4 мкм против 8,5 мкм у мраморной муки).

Наполнители совместно с вяжущими веществами участвуют в формировании микроstructures материала, которая претерпевает существенные изменения. Так, внутренние дефекты, связанные с наличием макропор, капилляров и микротрещин, существенно уменьшается, что обеспечивает снижение концентрации напряжений. При создании отделочных составов для фасадов зданий карбонатные материалы могут быть использованы как заполнители для получения бугристых фактур.

Волокнистые материалы. Добавки в бетоны и строительные растворы в виде волокон и дисперсных волокнистых частиц используются достаточно давно и эффективно, т. к. позволяет создать равномерно распределенное армирующее упрочнение массива конгломератного материала. Микроармирование строительных растворов позволяет в 3–5 раз повысить устойчивость материала к ударным воздействиям и раскалыванию; способствует уменьшению усадочных деформаций, обеспечивает прочность и долговечность строительного раствора.

По виду и характеру используемого сырья волокнистые добавки делятся на следующие: минеральные, органические, металлические. Кроме того, по происхождению все волокнистые материалы, используемые в качестве микроармирующих добавок, могут быть природными и искусственными. В свою очередь и природные, и искусственные волокна могут быть органическими и минеральными.

Самыми древними волокнами природного происхождения можно считать волокнистые фрагменты из растительного сырья – древесины, соломы, камыша и пр., которые нашли свое применение при производстве саманных изделий и растворных смесей для кладки из саманных блоков. Кроме того, они успешно использовались в сочетании с гипсовыми вяжущими для гипсопрокатных и гипсоволокнистых плит, блоков и панелей. Для использования с цементными вяжущими требуется длительная химическая обработка этих волокон с целью нейтрализации редуцирующих веществ, поэтому в цементных композициях они применяются реже.

Природным минеральным волокнистым веществом является хризотил-асбест, который десятилетия используется при изготовлении асбестоцементных изделий. Кроме того, из него успешно изготавливают теплоизоляционные и пожароустойчивые изделия широкой номенклатуры. А также растворы и составы для заделки стыков, швов и сопряжений различных элементов и конструкций.

Последние десятилетия, благодаря интенсивному развитию промышленности полимерных материалов, широкое распространение получили искусственные полимерные волокна: фиброволокно на основе целлюлозы, полиэтилена, полипропилена, полиамида, полиакрилата, полиэфира, кевлара и др..

Из неорганических искусственных волокон следует отметить базальтовое фиброволокно, углеродные и стеклянные волокна, и др.

Все они в разной степени нашли распространение для сухих строительных смесей в качестве микроармирующих волокон, обеспечивающих при минимальных расходах достаточно эффективное дисперсное армирование. Дисперсная арматура (фибра) используется во всех конструкциях, где необходимо предотвратить появление пластических усадочных трещин, например, для полов промышленных помещений, складов, теплых полов, стяжек, гидротехнических сооружений, в дорожном строительстве, в торкретбетоне, пенобетонных блоках. Большинство искусственных волокон обеспечивает равномерное распределение их в структуре строительных растворов и обладает высокой стойкостью к кислотам, щелочам и солям, поэтому может эффективно применяться в ремонтных составах, штукатурных и кладочных растворах, сухих смесях различного назначения.

Рекомендуемые максимальные размеры волокнистых добавок, позволяющие готовить технологичные растворные смеси, составляет от 2 до 12 мм. Расход добавок зависит от назначения состава и вида добавки.

Асбест. Асбест – один из уникальных природных волокнистых материалов, представляющий собой водный силикат. Наибольшим промышленным спросом пользуется хризотил-асбест, составляющий около 95 % мировой добычи асбеста. Асбест обладает высокой прочностью на растяжение, большой удельной поверхностью и хорошей сопротивляемостью к повышенным температурам. Это объясняется трубчатым строением волокон и их химическим составом. Стенка асбестовых трубочек составляет 30–80 нм; волокна диаметром 10–100 мкм имеют прочность на разрыв 600–800 МПа, а модуль упругости хризотил-асбеста составляет $1,75\text{--}1,85 \times 10^{11}$ Па. Асбест не горит и при повышении температуры до 400–500 °С не теряет своих свойств. Кроме того, асбест обладает уникальной адсорбционной способностью, так как у него один из самых больших показателей удельной поверхности на единицу массы (15–20 м²/г).

По химическому составу асбест в основном представлен двуоксидом кремния (SiO₂ – 39–43 %), оксидом магния (MgO – 40–44 %) и водой (H₂O – 12–13,5 %). Остальные элементы – Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, Na₂O – имеются в незначительном количестве. Асбест обладает высокой щелочестойкостью, что способствует более прочному сцеплению с цементом. Установлено восемь сортов асбеста 0–7 в зависимости от длины волокна; по степени распушки четыре группы – жесткий, промежуточный, полужесткий и мягкий; по толщине в поперечнике – иголки (диаметр до 2 мм) и кусковой асбест – более 2 мм.

Из асбеста изготавливают ткани, бумагу, картон, шнуры, электротехнические изделия и другие материалы. Широкое распространение получили асбестоцементные изделия в виде труб, плит, пластин, листов и различных технических и декоративных элементов для строительных целей. Для этих изделий используется коротковолокнистый асбест 3, 4, 5 и 6 сортов с длиной волокон от 0,01 до 10 мм.

Отходы асбестоцементного производства. Отходы при производстве асбестоцементных изделий образуются при следующих технологических переделах: бой асбестоцементных изделий, обрезка лишних фрагментов до требуемых размеров, отходы при производстве труб и фитингов, пыль от резки и шлифовки, а также возможный брак по различным позициям номенклатуры. Общий объем отходов может составлять до 5–6 % для сухих и до 2–3 % для влажных отходов от массы сырья. Влажные отходы могут являться осадками сточных вод и отводиться за пределы предприятия в открытые хвостохранилища, занимая обширные территории.

Асбестоцементные отходы, состоящие из асбеста и гидратированного цемента, могут быть использованы для получения различных строительных материалов, что обусловлено с одной стороны их составом, а с другой – необходимостью снижения загрязняющих веществ и улучшения экологии территорий вблизи предприятий стройиндустрии.

Состав отходов асбестоцементного производства имеет более широкий спектр включений, что обуславливает их высокую потенциальную гидравлическую активность. Так, SiO_2 может содержаться от 14 до 25 %; Al_2O_3 – 2,2–7,3 %; Fe_2O_3 – 2,5–8,9 %; CaO – 32–53 %, SO_3 – 0–3–6,5 %.

Считается целесообразным использование асбестоцементных отходов в следующих направлениях.

Активизация отходов методом механоактивации и возвращение в технологический процесс.

Повышение активности обжигом при температуре 700 °С с использованием специального оборудования.

Увеличение активности при совместном использовании с кремнеземистыми компонентами (фосфорными шлаками, золами ТЭЦ, кварцевым песком и др.

Добавка при производстве асбестоцементных изделий после дробления и измельчения.

Производство бетонных цементных и силикатных блоков, используя асбестовую стружку, пыль и молотые отходы.

Использование в качестве безобжигового заполнителя в растворах и бетонах.

Применение в качестве наполнителя в огнезащитных составах и композициях.

Шпатлевочные составы для защитных и отделочных работ.

Использование в качестве тонкомолотого наполнителя битумных рулонных материалов.

Применение в качестве компонента сухих строительных смесей.

Дорожное строительство.

Анализ многочисленных публикаций по способам утилизации отходов асбестоцементного производства показывает, что из них можно получать материалы и изделия с различными свойствами. Рациональным является применение в автоклавных материалах на портландцементе путем введения в состав бетонной смеси тонкомолотого затвердевшего асбестоцемента в количестве 6–8 % массы цемента, что способствует повышению прочности. Увеличение активности отходов за счет обжига при 700 °С и последующего помола требует больших энергетических затрат и специального оборудования.

Более привлекательным вариантом при имеющемся технологическом оборудовании является производство сухих смесей с использованием техногенных отходов асбестоцементного производства. Их участие в качестве активных минеральных добавок способствует повышению прочности за счет химической активности отходов и качества сухих смесей.

Известен опыт Германии подтвердивший, что после тепловой обработки 5 %-ная добавка этих отходов обеспечивает ускорение набора прочности на 15–20 % в 2-суточном возрасте и на 10–15 % – в возрасте 28 дней.

Таким образом, использование асбестоцементных отходов в различных составах и технологиях может быть вполне эффективно и рационально.

5.6. Модификация сухих строительных смесей полимерными добавками

Модификация минеральных строительных материалов и смесей органическими веществами в форме водных дисперсий и композиций известна с давних времен. Уже в 1932 году было впервые описано применение химически синтезированного полимерного термопластичного латекса для модификации цементных растворов и бетона. Водные дисперсии добавлялись на стройках при замесе строительных растворов с водой.

Применение в существенных объемах порошкообразных, термопластичных полимеров, так называемых дисперсионных порошков, началось в 70-х годах. Германский концерн Wacker Chemie (Германия) был первым в мире производителем и поставщиком дисперсионных порошков для промышленности стройматериалов. В настоящее время полимерные добавки производят несколько фирм – производителей, в том числе: BASF (Германия), Dow Chemical (США), Elotex, NSC (Швейцария), Index (Италия), Samsung (Корея) и другие.

Современные производители располагают значительным набором мономеров и полимеров. В соответствии с видом исходных компонентов производимые полимеры делятся на группы: полимеры с виниловым эфиром, этиленом, винилхлоридом, акрилатом и другими исходными мономерами. Благодаря тому, что этилен обладает низкой температурой стеклования в сочетании с винилацетатом, эта комбинация позволяет получать мягкие, гибкие и долговечные сополимеры, обладающие устойчивостью против омыления в среде цементных составов.

Преимущества модифицированных полимерами сухих смесей по сравнению с растворами, модифицируемыми жидкими дисперсиями:

- значительное повышение производительности труда на стройке;
- более простая транспортировка и обращение;
- исключение опасности замораживания;
- высокий и стабильный уровень качества работ;
- упрощение утилизации тары.

Комбинация дисперсий и порошков с цементом. *Общеизвестный факт, что наиболее* распространенным видом минеральных вяжущих для строительных целей является портландцемент, обладающий весьма ценным набором качественных показателей: высокая прочность, хорошая адгезия к большинству природных и искусственных каменных материалов, водостойкость, технологичность и эксплуатационная надежность. Недостатком цемента может быть некоторая неоднородность состава, существенные показатели усадочных деформаций и пониженная прочность при изгибе и растяжении. Однако эти отрицательные характеристики могут быть сnivelированы путем введения различных пластифицирующих добавок и подбором определенного химического состава исходного сырья.

Цемент набирает прочность (отверждается) в результате химического взаимодействия его компонентов с водой (гидратации). Здесь используется вода, поступившая при затворении. При дефиците воды для гидратации, цемент не набирает в полном объеме прочностных показателей, что особенно необходимо учитывать при использовании в тонких слоях и на небольшой поверхности. Особенно важно это учитывать при монтажных и штукатурных работах с пористым материалом (кирпич, газобетона, шлакоблоки и др.) или в случае нане-

сения защитных и отделочных материалов, требующих дополнительного количества воды для гидратации цемента. Вода быстро поглощается впитывающей основой или испаряется. Не полностью схватившийся цемент в составе строительного раствора лишь частично срабатывает как минеральное вяжущее, что проявляется в создании рыхлой неплотной структуры, завышенной усадке, низкой прочности, недостаточной величине адгезии к каменному основанию; кроме того, отмечается повышенная чувствительность затвердевшего раствора к влаге. В перечисленных случаях предварительно требуется увлажнять соединяемые поверхности или ухаживать за нанесенными составами путем орошения водой.

Сухие смеси для плиточного клея. Раствор на основе цемента не склеивается, например, с деревом и ПВХ. При введении органических вяжущих становится возможной адгезия цементных растворов к таким основам. Улучшается прочность сцепления с бетоном и сталью. Клеи для плитки с высокой деформируемостью могут полностью компенсировать срезающие нагрузки, которые появляются между покрытием и основой вследствие усадки твердеющего строительного раствора или бетона, а также из-за различного температурного линейного расширения основания и материала покрытия. При применении классических плиточных клеев, не способных компенсировать деформации, возникают повреждения облицовки (трещины, сколы, отслоение или полностью отваливающаяся плитка). Для предотвращения высокой деформируемости затвердевших клеевых растворов необходимо в их состав вводить минеральные и органические добавки направленного действия, особенно при облицовке наружных стен. Значительно снижается адгезия после многократного замораживания и оттаивания затвердевшего клея.

Добавление в клеевые сухие строительные смеси дисперсионных порошков и метилцеллюлозы придает плиточным клеям повышенную адгезионную способность и фиксирующие свойства, т.е. плитка при ее наклейке на стену не сползает. Это позволяет плиточникам работать без привычной дополнительной оснастки.

Сухие смеси для ремонта и санирования бетона. Наряду с повышенной и улучшенной адгезией к стальной арматуре и старому бетону, ремонтный строительный раствор должен обладать несколько пониженным значением модуля упругости по сравнению с ремонтируемым старым бетоном. При этом, прочность на растяжение при изгибе ремонтного раствора должна быть, по возможности, не ниже ремонтируемого материала, а лучше иметь более высокие значения.

Модифицирование полимерными композициями и добавками способствует снижению модуля упругости ремонтного раствора. Причем, этот процесс хорошо коррелирует с дозировкой полимеров. При повышенном содержании предел прочности на растяжение при изгибе увеличивается. Многие из выпускаемых в настоящее время для строительных целей растворные смеси для сухого торкретирования могут быть модифицированы дисперсионными полимерными порошками. Во время затворения сухой смеси водой непосредственно перед выходом массы из сопла, происходит очень быстрое и полное редиспергирование дисперсионных порошков, поэтому их использование в качестве добавок вполне оправдано для составов различного назначения.

Дополнительным важным эффектом при модификации сухих строительных смесей полимерами в виде дисперсий и дисперсионных порошков является уменьшение проникновения хлоридов и углекислоты, что способствует защите от коррозии и сохранности арматура в бетоне и ремонтном растворе.

Смеси для саморастекающихся наливных полов. При повышенных требованиях к растяжению при изгибе, адгезии к основанию, трещиностойкости, пониженной усадкой и гибкостью, важной составляющей является износостойкость и долговечность.

Кроме того, эти составы должны обладать лучшей растекаемостью и способностью создавать глянцевую поверхность, что может быть достижимо при целенаправленном со-

четании добавок различного действия, например, дисперсий и дисперсионных порошков с разжижителями и другими компонентами.

5.7. Минеральные штукатурки и системы полной теплоизоляции

Для штукатурных составов из сухих смесей используются специальные дисперсионные порошки, придающие растворам гидрофобный (водоотталкивающий) характер. Во всех видах минеральных штукатурных составов и в теплоизолирующих штукатурках модификация дисперсионными порошками гидрофобного действия создает комплекс положительных эффектов, к которым относятся: технологичность, повышенная вязкость, высокая адгезия, достаточная деформативность и гибкость, пониженное водопоглощение и гидрофобные свойства. Благодаря пониженной водопотребности такие штукатурные составы из сухих смесей обладают пониженной склонностью к высолам и загрязнению, сохраняя длительное время эти замечательные эксплуатационные качества.

Одним из важнейших достижений в области улучшения свойств сухих строительных смесей благодаря их модификации полимерными дисперсными порошками является улучшенная технологичность по таким показателям, как пластичность, склонность к сворачиванию и значительно лучшие показатели наносимости на обрабатываемые каменные или бетонные поверхности.

5.8. Гипсосодержащие строительные смеси

Предлагаемое промышленностью большое количество сухих смесей на основе гипсовых продуктов в строительстве объясняется огромным набором достоинств их по сравнению с другими вяжущими:

- хорошая прочность и твердость (в сухом состоянии);
- время схватывания можно в широком диапазоне отрегулировать путем смешения сортов гипса со вспомогательными добавками;
- относительно низкая теплопроводность;
- малая звукопроводность;
- высокая паропроницаемость;
- короткое время схватывания и высыхания;
- высокая стойкость против климатических воздействий (в сухом состоянии);
- хорошая химическая стойкость, высокая огнестойкость;
- надежное и простое применение за счет возможности изготавливать гипсовые сухие смеси;
- широко распространенный и недорогой стройматериал.

Главным недостатком гипсосодержащих строительных материалов является низкая водостойкость, обусловленная высокой растворимостью затвердевшего гипсового камня. Даже при небольшом превышении влажности прочность гипсовых изделий существенно снижается, что обуславливает их применение только для внутренних условий эксплуатации и выполнения отделочных работ.

Улучшение свойств особенно в области технологичности переработки может быть достигнуто при введении дисперсионного порошка в гипсопесчаный раствор. Гипсопесчаные растворы, модифицированные дисперсионными порошками, отличаются от немодифицированных составов улучшением адгезии к органическим и минеральным основаниям, а также некоторым замедлением сроков схватывания смеси. Дисперсионные порошки влияют на скорость капиллярного водопоглощения, снижая процесс насыщения образцов влагой и в целом уменьшая показатели водопоглощения при повышении водостойкости.

Введение дисперсионных порошков улучшает свойства гипсоизвестковых штукатурных составов для стен. Кроме улучшения технологических свойств повышаются прочность на растяжение при изгибе, деформируемость, снижается водопоглощение. Кроме того, введение дисперсионных полимерных порошков создает условия для изготовления гипсоизвестковых штукатурок для наружных работ. Это свойство данные составы могут приобрести за счет долгосрочного гидрофобного действия вводимых добавок

5.9. Факторы, влияющие на структуру и прочность материалов из сухих строительных смесей

При использовании различных смесей представляется необходимым изучение свойств и особенностей цементно-минеральной матрицы, изменения структуры цементного камня в присутствии различных добавок и заполнителей.

Процесс формирования структуры и свойств строительных материалов на основе сухих смесей несколько отличается от структурообразования минеральных бетонов с крупным заполнителем. Особенности структуры строительных растворов, полученных из сухих строительных смесей с добавками во многом определяются степенью воздействия. Активность добавок обуславливается природой материалов, видом основы и способом подготовки поверхности; условиями, при которых протекает технологический процесс производства работ, а также структурообразованием материала из сухой растворной смеси.

Важным фактором для всех видов материалов является степень измельчения исходного сырья и наличие примесей различного рода. Многими исследователями отмечается важность анализа явлений, протекающих на межфазной границе раздела наполнитель – вяжущее, что также актуально и для создания различных композиционных материалов. Показано, что действие высоких температур и измельчение минеральных порошков способствуют физико-химической активности поверхности частиц. Это в свою очередь приводит к физико-химическим изменениям наполнителя и добавок, что способствует дополнительному усилению всей системы. Наиболее эффективный и распространенный способ получения материалов с добавкой микронаполнителей волокнистой структуры, в том числе органического и минерального происхождения, – способ контактного омоноличивания. Он использует принцип склеивания двух поверхностей тонким слоем минерального вяжущего. Отмечено, что уменьшение толщины клеевого шва при равномерном распределении связующего по поверхности волокон способствует общему усилению композиционного материала. При стабильности и равномерности связи между частицами покрытия достигается эффект оптимальной структуры, что приводит к повышенной устойчивости и сопротивляемости к внешним воздействиям.

При введении органического наполнителя в матрице развиваются два альтернативных процесса. С одной стороны, протекает процесс упрочнения материала за счет введения в матрицу дисперсных частиц за счет перехода материала в контактное пространство из объемного состояния в пленочное с повышенной прочностью и направленностью упорядочения структуры. В то же время, в композите идет процесс разупрочнения материала, вызванный повышенным содержанием наполнителя в объеме всей системы, что приводит к повышенной дефектности микро– и макроструктуры.

Долговечность мелкозернистого бетона или строительного раствора зависит от многочисленных факторов, которых выделяют более ста. Морозостойкость растворов на основе минеральных вяжущих коррелирует с параметрами его пористости. К числу факторов, в наибольшей степени снижающих долговечность строительного раствора, могут быть отнесены следующие: раннее высыхание или обезвоживание, ведущее к неполной гидратации цемента; резкие скачки температур, приводящие к появлению трещин; преждевременные статические

и динамические нагрузки; неправильная техническая эксплуатация. К деструкции также приводит попеременное увлажнение и высушивание, способствующие возникновению внутренних напряжений в твердеющем строительном растворе.

С точки зрения долговечности наиболее высокие характеристики показывает строительный раствор, твердеющий при нормальных температурно-влажностных режимах. Снижается долговечность у термообработанного гидрофобизированного материала, твердеющего на воздухе. Еще меньшей долговечностью обладает непластифицированный строительный раствор, подвергнувшийся пропариванию.

При малых водоцементных отношениях (0,55–0,70) микротрещины имеют межкристаллитный характер и проходят по зернам C_3S в цементном камне.

При водоцементном отношении от 0,73 до 0,90, значительно растёт пористость цементного камня и количество кристаллов $Ca(OH)_2$. Микротрещины при этом имеют транскристаллитный характер и проходят по зернам портландита. Это характеризуется также микротрещинами, идущими сквозь капиллярные, структурные поры и вдоль крупных микротрещин в контактной зоне на границе заполнитель – цементный камень. Для мелкого заполнителя, который служит для изготовления всех сухих строительных смесей, развитие трещин может зависеть от природы песка и микрозаполнителя.

Характер связи сцепление цементного камня с заполнителем зависит от вида цемента и заполнителя. Минимальная прочность сцепления происходит при использовании базальтового заполнителя, максимальная – при использовании низкоалюминатного сульфатостойкого цемента. Разрушение обычно происходит в зоне контакта в системе заполнитель – цементный камень.

Прочность сцепления цементного камня с заполнителем снижается вследствие повышения водоцементного отношения.

Добавка в воду затворения поверхностно-активных веществ приводит к увеличению прочности сцепления заполнителя с цементным камнем и усилению всего композита.

Аналогичный эффект проявляется при обработке поверхности заполнителя композицией, содержащей жидкое стекло. При этом отмечено повышение прочности сцепления заполнителя с цементным камнем. Отмечаемый эффект происходит за счет взаимодействия между ним и $Ca(OH)_2$, образующимися при гидратации цемента, что приводит к увеличению прочности сцепления на границе: «заполнитель – цементный камень».

На прочность сцепления цементного камня с заполнителем существенное влияние оказывает вид и качество цемента. Так, для обычного портландцемента прочность выше по сравнению с цементным камнем из шлакопортландцемента. Разнятся показатели при использовании различных видов заполнителя. Например, прочность сцепления с известняком выше, чем с кварцем и др.

Результаты исследований распределение пор и степень гидратации цемента в контактном слое на границе цементный камень – заполнитель можно определить методом сканирующей электронной микроскопии. Показано, что общее количество негидратированных частиц цемента в контактной зоне невелико и имеет тенденцию увеличения по мере удаления от гранулы заполнителя на расстояние от 1 до 30 мкм. Одновременно отмечено уменьшение пористости цементного камня от 18–20 до 8–10 %, что объясняется связыванием адсорбционной влаги на поверхности сухого заполнителя.

Введение в цементное вяжущее 12–15 % кремнеземистой пыли, содержащей 96–97 % SiO_2 , приводит к уменьшению прочности сцепления между цементным камнем и заполнителем. В то же время отмечено, что прочность цементного раствора в целом увеличивается за счет повышения прочности и усиления цементного камня.

Различия контактной зоны по структуре и составу затвердевшего цементного камня могут быть вызваны с присутствием или отсутствием кремнеземистых составляющих, об-

разующихся при интенсивном перемешивания компонентов растворной смеси. Отмечено, что при введении в цементное вяжущее кремнеземистой добавки контактная зона «заполнитель – цементный камень» не содержит этtringита и портландита. При применении, например, мелкого гравия в качестве заполнителя последний контактирует непосредственно гелем C-S-H, что способствует образованию выше указанных минералов.

Показано, что введение шлака в цементное вяжущее способствует уменьшению пористости контактной зоны на 5–10 %. Более высокая прочность композита отмечается при применении известнякового заполнителя. Для получения большей степени однородности цементного камня в контактной зоне и обеспечения высокой трещиностойкости при применении расширяющихся цементов и различных минеральных добавок, рекомендуется вводить кремнеземистую пыль. При этом в контактной зоне образуется меньшее количество портландита.

Введение инертных минеральных добавок в состав сухих растворных смесей в объёме до 10 % при В/Ц $\geq 0,4$ не влияет на микроструктуру контактной зоны, кроме тех, у которых повышенное водоотделение. Пуццолановые добавки, хотя и участвуют в формировании структуры цементного камня, способствуя снижению капиллярной пористости контактной зоны, оказывают незначительное влияние на уменьшение объемного содержания портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Контактная зона между цементным камнем и различным по структуре и свойствам наполнителем существенно отличаются друг от друга. Для керамической оплавленной поверхности, представляющей собой нейтральную для цемента структуру, характер пористости цементного камня будет приближаться к тяжелому заполнителю, например граниту или сиениту. Непосредственно на границе контакта пористость может быть несколько выше, чем у цементного камня на определенном расстоянии от заполнителя. Это явление объясняется образованием и присутствием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и этtringита. В случае пористой структуры заполнителя (керамзитовый или шлаковый песок) контактная зона отличается повышенной плотностью и однородностью, что объясняется полной гидратацией цемента и формированием структуры за счет постепенного роста кристаллов. Кроме того, при использовании пористых заполнителей создается прочное механическое зацепление между заполнителем и цементным камнем, повышающее прочность затвердевшего строительного раствора.

Введение дробленого мрамора в качестве заполнителя приводит к модифицирующему воздействию на морфологию и взаимное расположение кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне. В этом случае вокруг зерен заполнителя отмечается дезориентация в расположении кристаллов гидроксида кальция, что способствует затруднению развития трещин в структуре материала. По данным некоторых исследователей оптимум свойств композита по прочности и трещиностойкости может быть достигнут при содержании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не более 2 % от массы цементного камня.

Как уже отмечалось ранее, гранулометрический состав заполнителей в значительной степени влияет на качество и длительную сопротивляемость затвердевшего минерального материала. Для зернового состава, не отвечающего требованиям оптимальной гранулометрии, отмечена осприимчивость к неблагоприятным условиям твердения. Так, эти составы строительных растворов наиболее подвержены ускоренным процессам карбонизации, что в целом приводит к снижению сопротивляемости и общей долговечности материала.

Напряженное состояние, возникающее в процессе структурообразования строительного раствора в каменной кладке не ограничивается действием только лишь усадочных напряжений растворной смеси на минеральном вяжущем и заполнителе. Качество и долговечность материала зависит от типа вяжущего, влажности и упругих характеристик наполнителя. При использовании материалов волокнистого строения отмечается процесс микроармирования. Пористые волокна могут оказать существенное влияние на величину коэффициента теплопроводности.

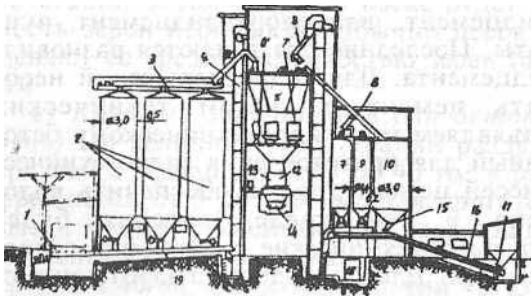


Рис. 5.5. Схема типовой бетонорастворной установки содной бетономешалкой емкостью 425 л; 1 – приемный бункер для цемента; 2 – банки для цемента и молотой извести; 3 – шнек; 4 – элеватор; 5 – рабочие бункера; 6 – дозатор для цемента; 7 – дозатор для заполнителей; 8 – поворотная воронка; 9 – бункеры подогрева для заполнителей бетона; 10 – бункер подогрева песка для раствора; 11 – ковшовый элеватор; 12 – бетономешалка; 13 – растворомешалка; 14 – раздаточный бункер; 15 – лотковый растворопитатель; 16 – ленточный транспортер; 17 – приемный бункер для заполнителей; 18 – бак для известкового теста с насосом-мешалкой; 19 – шнек

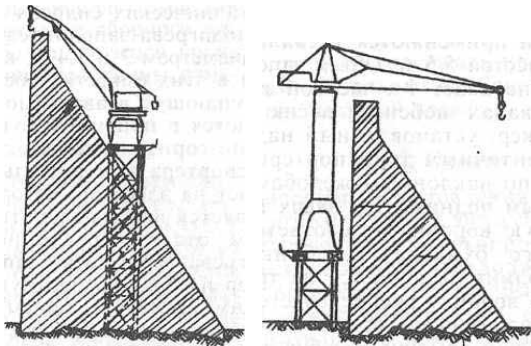


Рис. 5.6. Бетонирование башенными кранами эстакады

точным транспортером, с транспортера заполнитель по наклонным желобам поступает на элеватор, которым поднимается вверх и направляется через поворотную воронку по соответствующим отсекам расходного бункера. Из бункеров подогрева через лотки заполнитель подается на транспортер и через поворотную воронку распределяется по отсекам. Цемент из приемного бункера подают шнеком в ковшовый элеватор, затем при помощи желобов в расходные бункера или силоса. Из расходных бункеров вяжущее поступает в дозаторы, а дальше в смесительные аппараты. Одновременно из дозирочной бачки подается вода в смесительный аппарат. Готовая смесь передается в раздаточные бункера, а затем в транспортные средства.

Высокие теплотехнические показатели строительных растворов могут быть получены при использовании грубоволокнистых наполнителей, что обеспечивает получение композита с мелкими порами. Определяющим свойством для теплопроводности, является пористость материала. Теплопроводность материалов зависит от объема пор, их типа и свойств пористой структуры. Материалы с мелкопористой структурой являются значительно лучшими теплоизоляторами по сравнению с крупнопористыми, в которых значительная часть передачи тепла осуществляется за счет конвекции и излучения.

5.10. Особенности технологии приготовления бетонной смеси для конструкций гидротехнических сооружений

При производстве сборного железобетона применение быстротвердеющих цементов требует использования бетономешалок принудительного типа. Технологический процесс в установках средней мощности запрограммирован по высотной схеме (рис. 5.5), которая заключается в том, что составляющие бетонной смеси поднимаются вверх в расходные бункера, а затем дозируются и перемешиваются по мере опускания. Вяжущие хранятся в металлических силосах емкостью 100 и 50 т. Силосы для подогрева заполнителей применяются металлические диаметром 3 и 1,4 м. высотой 5,5 м. Объем заполнителей в этих емкостях обеспечивает 4-х часовой запас. Поступающие в автосамосвалах щебень и песок выгружаются в приемный бункер, установленный над наклонно-горизонтальным ленточным транспортером, с транспортера заполнитель по наклонным желобам поступает на элеватор, которым поднимается вверх и направляется через поворотную воронку по соответствующим отсекам расходного бункера. Из бункеров подогрева через лотки заполнитель подается на транспортер и через поворотную воронку распределяется по отсекам. Цемент из приемного бункера подают шнеком в ковшовый элеватор, затем при помощи желобов в расходные бункера или силоса. Из расходных бункеров вяжущее поступает в дозаторы, а дальше в смесительные аппараты. Одновременно из дозирочной бачки подается вода в смесительный аппарат. Готовая смесь передается в раздаточные бункера, а затем в транспортные средства.

5.10.1. Бетонные смеси для монолитного бетона

а) Цементы для бетона.

Для бетонных смесей применяются следующие виды цемента: портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановые цементы. Последние два являются разновидностями портландцемента. Для гидросооружений необходимо выбирать цемент с учетом технических

требований, предъявляемых к гидротехническому бетону. Предназначенный для приготовления гидротехнических бетонных смесей цемент должен обеспечить водостойкость бетона в той среде, которая будет воздействовать на гидротехнические сооружения в процессе их эксплуатации. Для подводного гидротехнического бетона применяется пуццолановый портландцемент. Для бетонных конструкций, расположенных в зоне переменных горизонтов воды, применяется портландцемент повышенных марок. При наличии сульфатной агрессии применяется сульфатостойкий портландцемент, к которому может быть отнесен шлаковый портландцемент. Для получения низкотермичного бетона рекомендуется применение шлакопортландцемента.

б) Мелкий заполнитель для бетона (песок).

Для бетона применяются пески речные, морские и овражные. Первые два вида песков имеют окатанную форму зерен, а овражные остроугольную (добытые путем размола щебня). Наиболее часто в песке встречаются вредные примеси, содержание которых должно быть не более: слюды 0,5 %, серного колчедана 1 %, глинистые и илистые частицы 5 %, гумусовые частицы 3 %. Особенно нежелательным является наличие в песке гумусовых частиц, так как они в соединении с натрием образуют соли, что вредно влияет на устойчивость и долговечность бетона. Гранулометрический состав песка имеет большое влияние на технологические свойства бетонной смеси. Характеристика песка как заполнителя для бетонной смеси определяется полностью ее пустотностью, зависящую от величины насыпной плотности и суммарной поверхности песка. Обычно пески, идущие на приготовление бетонной смеси, имеют пустотность в пределах 30–40 %. Чем больше пустотность песка, тем больше потребуется цементного теста для заполнения этих пустот. Если заполнить цементным тестом только пустоты между зернами песка, то получится жесткая малоподвижная смесь, непригодная для укладки. Для бетона наиболее пригоден крупный песок, содержащий достаточное количество средних и мелких зерен. При таком сочетании объем пустот в песке будет малым и поверхность зерен небольшая. Обычно песок для бетона применяют со средней крупностью зерен (d_{cp}) от 0,25 до 0,3 мм.

в) Крупный заполнитель для бетона (гравий и щебень) По величине зерен гравий разделяют на рядовой средний с фракциями от 5 до 40 мм и рядовой крупный с фракциями от 5 до 150 мм. Для приготовления бетонной смеси гравий отсеивают на следующие фракции: особо мелкий 5–10 мм, мелкий 5–20 мм, средний 20–40 мм крупный 40–80 мм, особо крупный 40–150 мм и выше. Пустотность гравия не должна превышать 45 %. Водопоглощение гравия из твердых пород составляет 12 %. Влажность обычно находится в пределах 24 %. Загрязнение гравия мелкими пылеватыми частицами допускается в пределах 12 %. Прочность зерен должна обеспечивать получение бетона прочностью выше заданной на 20–50 %. Гравий считается морозостойким, если в насыщенном водой состоянии выдерживает без разрушения многократное замораживание с потерей веса не более 10 %. Щебнем называется материал, полученный в результате дробления камней из твердых горных пород. К его крупности, зерновому составу, прочности и морозостойкости предъявляют те же требования, что и к гравию.

г) Вода для приготовления бетонной смеси. Для приготовления бетонной смеси применяют любую воду, кроме кислой. Вода не должна содержать сульфитов более 700 мг/л и всех солей не более 5000 мг/л. Воды сточного происхождения, имеющие в своем составе жиры, не должны применяться для приготовления бетонной смеси.

д) Пластифицирующие добавки. Пластифицирующие добавки в виде сульфито-спиртовой барды, абиетиновой смолы, омыленного пека и др. дают возможность усовершенствовать технологию приготовления бетонной смеси. Кроме экономии цемента, пластифицирующие добавки в первый период твердения бетонной смеси уменьшают тепловыделение в бетоне. С уменьшением расхода цемента уменьшается объем цементного камня в бетоне, а значит

улучшается его качество. Применение барды на строительствах с большим объемом бетонных работ приводит к следующим преимуществам: уменьшение расхода цемента на 8–10 %; улучшается прочность, водонепроницаемость, морозостойкость и водостойкость бетона; улучшается связанность бетонной смеси, что облегчает ее выгрузку: облегчается процесс уплотнения бетонной смеси; замедляется загустение бетонной смеси и удлиняются сроки схватывания цемента в бетонной смеси; улучшается удобоукладываемость бетонной массы, вследствие чего время ее вибрации может быть сокращено; облегчается изготовление бетонной смеси за счет сокращения времени перемешивания.

5.10.2. Приготовление бетонной смеси

Бетоносмесительное устройство является самой ответственной частью всего бетонного хозяйства. В настоящее время бетономешалки выпускаются двух видов: с опрокидывающимся и неопрокидывающимся барабанами. Схема выдачи бетонной смеси зависит от принятого вида транспорта бетона. Обычно смесь выгружают в бункер, расположенный под бетономешалкой. Если бетонная смесь подается на транспортер, то обычно бункер имеет шторный затвор, дающий равномерную его загрузку. Типовые секции автоматизированного бетонного завода с бетономешалками состоят из надбункерного отделения, расходного бункера из шести отсеков, дозирочных и смесительных отделений, а также отделений выдачи бетона (рис. 5.5). В надбункерное отделение цемент подается механически или пневматическим транспортом, а заполнители для бетона перемещаются наклонным ленточным транспортером. В нижней части бункеров крепятся автоматические весовые дозаторы. Из дозирочного бачка в бетономешалку поступает вода. Готовая бетонная смесь выгружается в раздаточные бункеры емкостью по два замеса.

5.10.3. Раздельное бетонирование

Раздельное бетонирование уже много лет применяется при подводной укладке бетона с использованием способов вертикально перемещающейся трубы и восходящего раствора. Применение этих способов бетонирования предусматривало снижение строительных затрат путем исключения работ по ограждению и осушению котлованов. В настоящее время существует три основных способа раздельного бетонирования: способ восходящего раствора, способ нисходящего раствора, способ погружения крупного заполнителя в раствор. Способы раздельного бетонирования имеют ряд преимуществ:

- а) исключается необходимость переработки крупных заполнителей в смесительных механизмах, благодаря чему загруженность этих механизмов сокращается более чем в два раза;
- б) сокращается расход рабочей силы, электроэнергии и транспортных средств, так как бетонный завод заменяется раствором заводом меньшей производительности;
- в) обеспечивается высокая интенсивность бетонирования;
- г) достигается улучшение процесса гидратации цемента вследствие постоянного перемешивания раствора во время перекачивания его в пустоты каменной наброски;
- д) значительно сокращается объем поровых пространств и следовательно, снижается расход цемента вследствие плотной упаковки частиц крупного заполнителя.

5.10.3.1. Способ восходящего раствора

Инъекционный способ. Его сущность заключается в том, что в опалубочном блоке устанавливаются металлические инъекционные трубы, по которым в пустоты между заполнителем нагнетается раствор. Инъекционные трубы могут быть расположены горизонтально или вертикально. Горизонтальное расположение труб может применяться для блоков шириной

до 8 м при нагнетании раствора с одной стороны и до 15 м при нагнетании раствора с двух сторон. При вертикальном расположении размеры блока в плане не ограничиваются. Опалубка блока принимается из инвентарных деревянных щитов, обшитых изнутри пергамином или толем. Она должна выдерживать давление 2,5 т/м. Если основанием блока является грунт, внутри его должна быть произведена бетонная подготовка, предупреждающая выдавливание раствора из-под щитов. Крепление щитов делается жестким для предотвращения образования щелей и утечки раствора. Крупный чистый заполнитель не должен иметь примесей фракций менее 30 мм. Верхний предел фракций крупного заполнителя достигает 150–200 мм. Фракция песка свыше 3 мм должны быть отсеяны. Для обеспечения большей вязкости и нерасслаиваемости раствора вводятся пластифицирующие добавки в количестве 0,15 % от веса цемента и абиегиновая нейтрализованная смола в количестве 0,02 %. Водоцементное отношение устанавливается в зависимости от состава раствора и количества вводимых пластифицирующих добавок, но не выше 0,65. – Особенностью этого способа является применение вибрации лишь после того, как произведено нагнетание раствора в заполнитель. Это позволяет исключить сухие контакты, часто имеющие место при предварительной вибрации сухих заполнителей. Анализ всех ранее известных и вновь полученных данных об инъекционном способе раздельного бетонирования показывает, что применение его встречает затруднения по следующим причинам:

а) вынужденные перерывы в работе бетононасоса продолжительностью более часа, связанные с отсутствием воды, поломкой деталей, отключением электроэнергии, неизбежно влекут за собой прекращение работ по бетонированию блока. Возобновление работ сопряжено с большими трудностями по разборке, промыве и сборке бетоновода инъекционных труб:

б) отсев щебня менее 20 мм вносит дополнительные затраты и требует создания спецсклада для отсортированных фракций;

в) неоднократный перенос растворного узла для приближения к объекту работ снижает темпы работ;

г) отсутствие контроля качества бетона во время его кладки.

Виброцементный способ. Является разновидностью способа восходящего раствора. Требования к опалубке такие же, как и в инъекционном способе. Скелет крупного заполнителя должен быть из сортового гравия или щебня одной из фракций: 20–40. 40–80. 80–120 мм. Песок применяется стандартный. Состав раствора от 1 : 1,5 до 1 : 2,5. В качестве пластифицирующей добавки применяется сульфатно-дрожжевая брижка (ССБ). Технология бетонирования заключается в следующем. Необходимая плотность укладки скелета из крупного заполнителя достигается вибрированием при засыпке блока щебнем или гравием. Раствор нагнетается в пустоты между заполнителем виброаппаратами. Перед засыпкой блока щебнем устанавливаются телескопические трубы на расстоянии до 2 м одна от другой. Диаметр в нижней части трубы должен быть таким, чтобы рабочая часть виброаппарата свободно помещалась внутри ее. Телескопические трубы выполняют роль обсадных труб. После частичного нагнетания раствора, толщина слоя которого равна рабочей части вибратора, поднимается виброаппарат, а затем телескопическая труба, и снова продолжается нагнетание. Подается раствор от смесительного агрегата к блоку насосом по бетоноводу. При этом способе бетонирования требуются механизмы для подъема телескопических труб и виброаппаратов во время бетонирования, что усложняет работы. Основным в виброцементационном способе является условие придать раствору свойства тяжелой жидкости. Это может быть достигнуто эффективным вибрированием бетонной смеси при соответствующей амплитуде колебания частиц, когда проникновение раствора в пустоты между зернами скелета обеспечивается внутренним давлением. Заполнитель приходит в движение в результате уменьшения трения между его частицами, и раствор проникает в пустоты равномерно, распределяясь во всем объеме блока подобно тяжелой жидкости, подчиняющейся законам гидростатики. Считается,

что вибрация способствует большему уплотнению заполнителя, благодаря чему снижается объем пор до минимума. Исследования позволяют сделать следующие выводы: а) плотный бетон при раздельном бетонировании способом цеменации может быть получен только с применением вибрации; б) этому способу присущи все недостатки инъекционного способа.

Способ Закавказметаллургстроя. Этот способ несколько отличается от предыдущих. Нижний предел крупности щебня или гравия при растворе на мелком песке составляет 40 мм, а при обычном песке 60 мм. Верхний предел крупности принимается в зависимости от рода бетонируемой конструкции и не должен превышать одной трети наименьшего измерения этой конструкции. Для уменьшения пустотности в скелете заполнителя целесообразно применять смесь крупного и мелкого камня в количестве не более 30 % от общего их объема. Крупность песка не должна превышать одной двадцатой среднего размера крупного заполнителя, но не должна быть более 5 мм. Раствор приготавливается в мешалке и нагнетается в заполнитель раствором– или бетононасосами. Перед загрузкой блока заполнителем устанавливаются металлические трубы диаметром 50–60 мм с надетыми на них спиралями из проволоки 2,5–5 мм при шаге 7–15 мм. Во время загрузки производится послойное вибрирование участков каменного скелета в течении 10–15 мин с помощью вибраторов, укрепленных сверху на этих же металлических трубах. После загрузки крупного заполнителя и его уплотнения металлические трубы извлекаются, в блоке образуется ряд цилиндрических скважин, в которых составляются спирали. Затем в эти скважины вводятся резиновые шланги, через которые насосами нагнетается раствор. По мере заполнения пустот скелета шланги поднимаются с таким расчетом, чтобы нижние концы их оставались в растворе не менее, чем на 50–60 см. Заполнение скважин, расположенных на границах раздела полос, должно производиться несколько раньше или одновременно с подачей раствора в другие скважины. Приведенный способ раздельного бетонирования является более простым по технологии, чем описанные ранее. Но он имеет ряд недостатков. В бетоне, полученном этим способом, всегда будут сухие контакты в результате вибрирования неувлажненных заполнителей. Отсутствие вибрации после нагнетания раствора вызывает образование пустот в кладке.

5.10.3.2. Способ нисходящего раствора

Отличительными особенностями способа являются применение крупного заполнителя прерывистой гранулометрии с низким содержанием песка и заливка раствора **без труб**.

Крупный заполнитель, укладываемый в блок слоями до 0,7 м, должен представлять собой рваный камень размерами 200–500 мм, а пустоты которого

Заполняются щебнем различных фракций.

Таблица 5.1

Содержание щебня в зависимости от его фракции

Содержание щебня в зависимости от его фракции					
Размер фракций, мм	40–25	20–10	10–5	5–2	2
Содержание, %	До 25	35–45	25–25	5–10	до 2

Смешение крупного и мелкого заполнителей производится как раздельной, так и одновременной загрузкой. После трамбования пустот крупного заполнителя мелким щебнем рекомендуется производить уплотнение каждого слоя вибротрамбованием, в результате чего достигается максимальная плотность заполнителей и минимальная пустотность скелета. Для получения бетона марки $R = 170 \text{ кг/см}^2$ приготавливается раствор состава, в частях: Портландцемент М 400–0,1. Тонкозернистый песок– 0,16 Вода – 0,65 Хлористый кальций (из расчета на безводный) – 0,02 Раствор подается в блок насосом по трубопроводу диаметром 75 мм, который оканчивается одним или двумя резиновыми шлангами. Предварительно

до загрузки блока щебнем в углах устраиваются так называемые карманы, огражденные металлической сеткой. В эти карманы вводятся резиновые шланги. Раствор из растворомешалки насосом подается по трубопроводу в карман, а из кармана вниз, где и растекается по блоку. По мере заполнения шланги приподнимаются. По окончании заливки поверхность блока обрабатывается поверхностным вибратором. Выделившаяся на поверхности вода удаляется. Заключение о методе нисходящего раствора:

а) предлагаемый способ бетонирования с применением прерывной гранулометрии заполнителей и отдельной их укладкой в блок с последующей заливкой цементным раствором для основных гидротехнических сооружений, подвергающихся воздействию воды и мороза, применять не следует, так как раствор в ряде мест не проникает в заполнитель, в результате чего образуются каверны и отдельные полосы сухого щебня;

б) применение этого способа бетонирования допустимо при возведении временных и вспомогательных сооружений, где не требуется значительной прочности и плотности бетона и не сказывается влияние атмосферных факторов.

5.10.3.3. Способ погружения крупного заполнителя в раствор.

Этот способ раздельного бетонирования в отличие от предыдущих заключается в том, что сначала в блок подается раствор, а затем в него втапливается с помощью вибрации крупный заполнитель. Под действием вибрации и силы тяжести крупный заполнитель втапливается в раствор, вытесняя излишек последнего вверх для обогащения следующей порции. Состав бетона подбирается обычным способом и проверяется на подвижность, которая должна быть 2–3 или 6–8 см осадки нормального конуса. Состав раствора колеблется в пределах 1 : 1,5 1 : 1,25. при этом содержание цемента на 1 м³ составляет не менее 280 кг/м³. С целью уменьшения расхода цемента применяются тонкодисперсные добавки (молотый песок, трепел и т. п.) при условии обеспечения заданных свойств раствора. Щебень крупностью свыше 20 мм укладывается равномерно по слою раствора. Наибольшая крупность заполнителя 160 мм.

Камни диаметром свыше 160 мм используются как «изюм». Щебень после подачи в блок подвергают вибрации. Его подают в таком количестве, чтобы после втапливания он был полностью погружен в раствор. Бетонирование ведется слоями. Уплотнение бетонной смеси должно осуществляться мощными пакетными вибраторами с тем, чтобы крупный заполнитель был полностью затоплен в слой раствора, налитый ранее в блок. Толщина рабочего слоя бетонной смеси должна равняться 2/3 длины рабочей части вибратора. К преимуществам указанного способа бетонирования следует отнести:

а) бетоносмесительные установки заменяются растворосмесительными, поэтому производительность последних может быть уменьшена почти в два раза при сохранении интенсивности бетонирования;

б) устраняется недостаток по неполному заполнению раствором пространства между частицами крупного заполнителя;

в) создаются более широкие возможности транспортирования крупного заполнителя при помощи конвейера;

г) отпадает операция по разравниванию бетонной смеси.

К недостаткам способа можно отнести:

а) высокий расход цемента (280 кг/м³);

б) необходимость одновременного действия двух видов и производительных транспортных средств; бетоновод, для крупного заполнителя транспортеры;

в) ограниченность применения при бетонировании массивов, связанная со сроком схватывания цемента;

г) наличие двух отдельных потоков материалов раствора и заполнителей, усложняющее производство работ.

5.10.3.4. Способы ТНИСГЭИ

Тбилисским научно-исследовательским институтом сооружений и гидроэнергетики предложены новые способы раздельного бетонирования

Гравитационный способ. При этом способе раствор проникает в пустоты крупного заполнителя только под действием собственной силы тяжести. Его использование рекомендуется для сооружений толщиной 0,5–1 м.

Виброгравитационный способ. Раствор проникает в пустоты крупного заполнителя при одновременном действии как гравитационной силы, так и вибрационных импульсов.

Виброинъекционный способ. При этом способе заполнение пустот крупного заполнителя производится раствором, подаваемым под напором, с последующим вибрированием гравийно-щебеночной массы. Способы раздельного бетонирования, предлагаемые ТНИСГЭИ, близки по своей сущности к описанным ранее.

5.10.4. Транспортирование и укладка бетонной смеси

Транспортирование бетонной смеси к блокам бетонирования и укладка ее являются наиболее ответственными элементами технологии возведения бетонных сооружений. На современных стройках получили распространение следующие виды транспорта бетонной смеси: автомобильный (самосвалами), крановый, конвейерный, бетононасосами, смешанный. Транспортирование бетона автосамосвалами получило массовое распространение при укладке бетона в нижние ярусы крупных гидросооружений и при бетонировании отдельных фундаментов промышленных сооружений. Наибольшее распространение имеет транспортирование бетона кранами. Конвейерный транспорт бетона не получил в гидротехническом строительстве широкого внедрения, так как при неточном его применении ухудшается качество бетона. При возведении крупных гидросооружений начинают внедрять бетононасосный транспорт. Широкое распространение получили на крупных стройках смешанные виды транспорта бетона: автосамосвалами в сочетании с конвейерами и различного типа кранами.

5.10.4.1. Транспортирование бетона автосамосвалами

При транспортировании бетонной смеси автосамосвалами следует различать два основных случая: перевозку бетона от бетонного завода непосредственно в блоки бетонирования и подвозку его от бетонного завода к кранам и другим механизмам, подающим бетон в блок. Для подачи бетона непосредственно в блок наиболее удобны самосвалы ГАЗ (объем бетонной смеси в кузове 1 м³) и ЗИЛ (объем бетонной смеси в кузове 1,6 м³). Самосвалы МАЗ (V_к = 2,25 м³) получили широкое распространение на подвозке бетона к блокам с последующей перегрузкой его для подачи кранами и другими приспособлениями. Самосвалы КрАЗ (V_к = 4,5 м³) целесообразно применять для перевозки бетонной смеси к приемным бункерам мощных бетононасосов. В зимнее время бетонную смесь выдают с бетонного завода подогретой. Для предохранения ее от остывания при перевозке автосамосвалами применяют следующие меры: кузов после загрузки накрывают брезентовым покрывалом. Иногда для подогрева кузова используется температура отработанных автомашинных газов.

5.10.4.2. Транспортирование бетона кранами

При возведении крупных сооружений для подачи бетонной смеси в блок получили распространение следующие краны: краны-деррики, молотковые, на гусеничном ходу, портално-стреловые, кабельные и башенные.

1. *Краны-деррики*. Основными достоинствами этого крана являются его полноповоротность, возможность установки на отдельных ряжах и бетонных тумбах, а также сравнительная быстрота монтажа и демонтажа. Основным недостатком крана является его стационарность и наличие вант, иногда загромождающих пространство в пределах фронта укладки бетона. Основные данные крана-деррика:

вылет стрелы – 37,4 м,
скорость подъема груза 0,27–0,6 м/с,
стрелы 0,2–0,22 м/с,
скорость вращения стрелы – 6,6 об/мин,
мощность электродвигателей – 77 кВт,
вес крана (без лебедок) – 26 т.

2. *Молотковые (двухконсольные) краны*. Имеют самоходный портал, передвигающийся по металлической эстакаде. Кран не обладает поворотливостью. Его двухсторонние консоли стрелы неподвижны. Преимуществом этих кранов являются большая высота подъема и вылет стрелы, значительная грузоподъемность.

3. *Краны на гусеничном ходу*. Транспортирование бетона гусеничными кранами получило широкое распространение в сочетании с подвозкой бетона к строительным площадкам автосамосвалами или в бадах на автомашинах. Основные данные гусеничного крана Э 1003:

длина стрелы с возможным удлинением – 23 м,
максимальный вылет стрелы от оси вращения – 17,7 м,
минимальный – 6,5 м,
грузоподъемность, соответствующая минимальному вылету – 8 т,
максимальному вылету – 1,2 т,
высота подъема груза при минимальном вылете стрелы – 19 м,
при максимальном – 16,6 м,
скорость подъема груза – 0,88 м/с,
вес крана – 40 т

4. *Портально-стреловые краны*. Наибольшее распространение при укладке бетона в средние и высокие части сооружений получили портально-стреловые полноповоротные краны, передвигающиеся по рельсам на специальной бетоноукладочной эстакаде. Основные данные портально-стрелового крана с «гуськом» следующие:

максимальный вылет стрелы – 40 м,
минимальный – 9 м,
грузоподъемность при максимальном вылете стрелы – 7,5 м,
при минимальном – 10 т,
высота подъема (общая) – 65 м,
высота от головки рельс кверху – 30,5 м,
книзу – 34,5 м,
скорость подъема груза – 0,67 м/с,
скорость поворота стрелы – 1,12 об/мин,
вес (без противовеса) – 288 т,
мощность двигателей – 1х15 кВт
1х100 кВт 1х56 кВт 1х32 кВт

Модернизированный тип портально-стрелового крана с «гуськом» имеет более надежную конструкцию поворотной части и большую скорость подъема груза. Основным недостатком крана этого типа является его сравнительно большой вес, требующий повышенного расхода металла на бетоновозную эстакаду и сложное управление «гуськом» стрелы. На строительстве применяют также портально-стреловые краны со стрелой без «гуська». Кран этого типа имеет следующие данные:

максимальный вылет стрелы – 375 м. грузоподъемность при максимальном вылете стрелы 10 т

при минимальном – 20 т вес крана – 145 т

мощность двигателей – 1х100 кВт

3х30 кВт 1х11 кВт

Большим недостатком портално-стреловых кранов является то, что эстакада, по которой движутся эти краны мешает монтажным, а иногда и строительным работам. Эти краны целесообразно применять там, где под эстакадой и по фронту ее располагается большая часть объема бетона.

5. Кабельные краны. В настоящее время крупные гидростроительства оснащаются кранами двух систем: параллельной и радиальной. Параллельный кабель-кран имеет две подвижные мачты, передвигающиеся одновременно по рельсовым путям, а радиальный кабель-кран одну неподвижную мачту и одну движущуюся по криволинейным рельсовым путям, описанным радиусом, равным пролету кабель-крана. Кабель-кран целесообразно применять для подачи бетона в отдельные элементы сооружения, не превращая его в основной механизм для транспортирования бетона. Использовать для этой цели кабель-краны рационально в тех случаях, когда, объем бетона в сооружении сосредоточен непосредственно в зоне, охватываемой этими кранами, например при возведении высоких плотин в ущельях.

6. Пашенные краны. Конструкция башенного крана состоит из неподвижной и вращающейся частей. Неподвижная часть представляет собой башню с порталом, имеющим четыре ноги с шаровыми опорами, установленными на четырехходовых тележках. Поворотная часть крана металлическая решетчатая башня, охватывающая верх нижней неподвижной башни. К поворотной части крана присоединяется шарнирно с одной стороны стрела, а с другой рама контргруза с механизмами для подъема груза, передвижения грузовой тележки и поворота верхней башни крана (рис. 5.5). Стрела состоит из двух сварных двутавровых балок. К нижним поясам балок на болтах присоединяются двутавры пути для грузовой тележки. При укладке бетона стрела закрепляется в горизонтальном положении. Перемещение груза по горизонтали производится грузовой тележкой, передвигающейся по стреле. В горизонтальном положении стрелу удерживают специальные тросы, подхватывающие ее в трех точках по длине.

7. Железнодорожные краны. На строительстве приплотинных гидроэлектростанций иногда используются для укладки бетона железнодорожные краны, работающие с бетоновозной эстакады в сочетании с порталностреловыми кранами. Они часто применяются при монтаже армоферм, крупноблочной опалубки и основного оборудования гидроузлов.

8. Краны на пневматическом ходу Краны, установленные на специальном шасси с пневматическими колесами, используются для укладки бетона в нижние ярусы отдельно стоящих небольших бетонных сооружений.

5.10.4.3. Транспортирование бетонной смеси мотовозами и виброхоботами

В практике гидротехнического строительства широкое распространение получила подача бетона в блоки бетонирования с бетоновозной эстакады. Бетонная смесь подвозится в бадьях, установленных на железнодорожных платформах с мотовозной тягой. В полу платформ делаются специальные отверстия, через которые бетонная смесь может поступать в виброхоботы. Бетон по виброхоботам, подвешенным к эстакаде, подается в блок бетонирования.

5.10.4.4. Транспортирование бетонной смеси насосами

Бетононасос работает по следующему принципу. Бетонная смесь из приемной воронки под влиянием силы тяжести и вакуума в цилиндре насоса через открытый всасывающий

клапан поступает в полость цилиндра. При нагнетательном ходе поршня бетонная смесь из цилиндра поступает в бетоновод. При следующих нагнетательных движениях новая порция бетона проталкивается в бетоновод и при полном его наполнении выбрасывается и место укладки. Выпускаемые бетононасосы не освободились от ряда конструктивных недостатков. При изготовлении их не всегда применяются качественные металлы, резина и другие материалы, особенно в ответственных узлах. Достоинства бетононасосов заключаются в следующем:

- а) полная механизация, быстрый темп работ;
- б) наиболее низкая стоимость подготовительных работ;
- в) производительность труда может быть доведена до 20 м³ в смену на одного рабочего;
- г) малые амортизационные отчисления благодаря небольшой стоимости бетононасосов;
- д) компактность оборудования и малая масса его на единицу производительности;
- е) большая маневренность в работе и возможность подачи бетона одним насосом в несколько мест одновременно;
- ж) приспособляемость ко всем видам строительных работ и любым условиям;
- з) непрерывность действия;
- и) несложность эксплуатации.

5.10.5. Укладка бетонной смеси в блоки бетонирования

Основное требование, предъявляемое к гидротехническому сооружению, это его монолитность, обеспечивающая почти полную водонепроницаемость сооружения. Неоднородность оснований сооружений, приводящая к неравномерности их осадок, требует устройства осадочных швов. Температурные деформации сооружений приводят к необходимости устройства температурных швов, которые часто совмещаются с осадочными. В этих постоянных швах, называемых конструктивными, устраиваются водонепроницаемые преграды в виде металлических уплотнений и битумных шпонок, предотвращающих фильтрацию воды через швы. Значительная величина усадочных деформаций в бетоне приводит к необходимости ограничения размеров блоков единовременного бетонирования, для чего секции сооружений приходится делить временными или рабочими швами на блоки требуемых размеров.

5.10.5.1. Подготовка блоков к бетонированию

В комплекс работ по подготовке блоков к бетонированию входят: установка арматуры, опалубки и закладных частей, подготовка бетонных поверхностей ранее уложенного бетона и установленной арматуры для сопряжения их со свежим бетоном. На поверхности отвердевшего бетона имеется пленка, которую необходимо удалить до укладки бетона в новый блок. При полном удалении пленки и хорошо промытой бетонной поверхности качество рабочих швов бетонирования получается таким, что бетон по шву практически можно считать монолитным. При недостаточно подготовленной и очищенной поверхности старого бетона в рабочих швах бетонирования чаще всего наблюдается фильтрация. При всех методах подготовки бетонных поверхностей у блока необходимо иметь источник сжатого воздуха и напорной воды. Скала в основании сооружений, включая все углубления в ней, а также щели и трещины, должна быть особенно качественно очищена от грязи и мусора, промыта водой и продута сжатым воздухом. Нескальный грунт основания непосредственно перед укладкой бетона также должен быть тщательно расчищен до слоев с ненарушенной структурой.

5.10.5.2. Распределение бетонной смеси по блоку бетонирования

На крупных гидротехнических строительствах для распределения бетона по блоку применяются бадьи, виброхоботы, вибротрубы и бетоноукладчики. При транспортировании смеси бадьями нужно соблюдать следующие основные технические условия:

а) равенство емкостей замеса бетономешалки и бадьи или лучше заполнять не больше 0,9 ее проектного объема с тем, чтобы сократить потери бетонной смеси на пути ее следования от бетонного завода до блока бетонирования;

б) бадьи лучше всего перевозить по железной дороге, по кольцевым путям при строгом графике, без потерь времени на лишние остановки;

в) поезд с бадьями должен двигаться вдоль кранов и за время остановки около каждого из них должен принять одну порожнюю бадью и выдать одну груженую, а вслед за этим немедленно направляться к следующему крану;

г) бадьи на железнодорожной платформе или автомашине необходимо закреплять брусками и направляющими устройствами для ускорения установки порожней бадьи на место. В каждом поезде должно быть одно свободное место для порожней бадьи, которая будет подана первым из кранов;

д) для повышения производительности кранов следует совмещать операции опускания или подъема бадьи с поворотом крана. Управление передвижением, опусканием и подъемом бадьи должно производиться сигнальщиком. Между сигнальщиком и машинистом крана необходимо устанавливать телефонную, телевизионную или радиосвязь;

е) бадьи с бетоном должны снабжаться металлическим жетоном, указывающим количество и марку бетона.

Большой распространение получили вибрлотки для распределения бетона в блоки. Вибрлотки могут изготавливаться на месте работ. Особенно они необходимы при подаче бетона из автосамосвалов в блоки. В этих случаях вибрлоток используется для распределения бетонной смеси по площади блока, расположенной между эстакадами для въезда самосвалов. Бетон выгружается при этом в бункер, подвешенный к эстакаде, а из бункера в вибрлоток, представляющий собой металлический желоб длиной 24 м. Вибрлоток подвешивается с одной стороны к бункеру, а с другой поддерживается тросом, что позволяет наклонять лоток под различным углом. На лотке укреплен вибратор, работа которого облегчает движение бетонной смеси по лотку.

5.10.5.3. Уплотнение бетонной смеси в блоках бетонирования

Уплотнение бетонной смеси производится вибраторами, которые бывают пневматическими, гидравлическими, электромеханическими, электромагнитными и с двигателем внутреннего сгорания. Наибольшее распространение получили электромеханические вибраторы. Они работают по принципу вращения неуравновешенных масс. При вращении вала электродвигателя возникает центробежная сила, которая прямо пропорциональна весу неуравновешенного груза, называемого эксцентриком или дебалансом. Величина эксцентриситета дебаланса пропорциональна квадрату скорости движения и обратно пропорциональна ускорению силы тяжести. Центробежная сила является возмущающей силой колебаний вибратора. Эти колебания через внешние части вибратора передаются бетонной смеси. В зависимости от способа передачи колебаний бетонной смеси вибраторы подразделяются на поверхностные и внутренние. Поверхностные вибраторы применяют для бетонирования плит и других сравнительно тонких конструкций. При уплотнении бетонной смеси внутренними вибраторами толщина укладываемых слоев должна быть не больше длины рабочей части вибратора. На каждой позиции вибратор работает установленное время (около 30 секунд). Указанием достаточности вибрирования бетона в данном месте и необходимости перестановки вибратора является появление на поверхности бетонной смеси цементного молока. Шаг перестановки вибратора должен быть не более полутора радиусов вибратора. Обычно это расстояние находится в пределах 50–70 см. Вибратор должен погружаться в бетонную смесь вертикально или слегка наклонно.

5.10.6. Технология непрерывного бетонирования

Результаты проведения исследований качества и однородности бетонной смеси показывают, что технология непрерывного бетонирования обеспечивает более высокое качество бетона и лучшую его однородность, чем технология, использующая механизмы периодического действия. Натурные замеры в различных условиях производства работ показывают, что современные технологии порционного приготовления, транспортирования и у кладки бетона должны уступить место технологии непрерывного бетонирования, обеспечивающей высокие темпы укладки бетона, высокое его качество, повышение производительности труда и снижение стоимости строительства. Установки непрерывного действия дают дополнительные возможности для получения в производственных условиях бетонов повышенной однородности и устранения основного недостатка существующей порционной технологии в отношении качества бетонов. Одно из основных преимуществ непрерывно-поточного приготовления бетонной смеси – получение однородности выпускаемой продукции, которая обеспечивается пропорциональной загрузкой всех компонентов бетона в бетономешалку. При разработке технологии непрерывного бетонирования следует:

а) максимально сокращать пути транспортирования бетонной смеси за счет соответствующего увеличения расстояния подачи сухой смеси заполнителей с целью повышения качества укладываемого бетона;

б) склады заполнителей использовать как бункера установок для автоматического дозирования сухой смеси.

При производстве бетонных работ на строительстве крупных гидротехнических сооружений выделяются три самостоятельные технологические схемы:

1. Приготовление высококачественного бетона в больших количествах.
2. Транспортирование бетона интенсивным потоком от бетонных заводов к месту укладки.
3. Распределение и укладка бетона в бетонируемое сооружение.

5.10.7. Зимнее бетонирование

Основное требование к зимнему бетонированию заключается в соблюдении заданного температурного режима на всех стадиях технологического процесса: при приготовлении бетонной смеси, ее транспортировке, укладке и выдерживании до набора проектной прочности бетона. Требование по температурному режиму бетона ведет к удорожанию стоимости зимнего бетонирования по сравнению с летними способами. Технология зимнего бетонирования, отработанная при строительстве крупных гидротехнических сооружений в Сибири и на Крайнем Севере, включает: регулирование температуры бетонной смеси путем подогрева ее составляющих; применение специальных утепленных транспортных средств, снижающих теплопотери бетона при его доставке к месту укладки; укладку бетонной смеси в обогреваемых тепляках и шатрах, обеспечивающих работу людей и механизмов в приемлемых температурных условиях; применение утепленной опалубки с эффективным утеплителем, обеспечивающим твердение бетона по методу «термоса»; применение периферийного электрообогрева, облегчающего работу опалубки при бетонировании по методу «термоса»; применение различных добавок, позволяющих бетону твердеть в условиях отрицательных температур: регулирование температурного режима бетонной кладки в пределах допустимых параметров между ядром и гранями блока. Для расчета нормального термовлажностного режима приготовления и укладки бетона исходной является температура бетонной смеси в момент укладки ее в блок. Эта температура в зависимости от типа конструкции, методов бетонирования и экзотермического разогрева цемента будет различной в одинаковых природно-климатических условиях. При бетонировании массивных блоков важно обеспечить минимальный температурный перепад между ядром блока и его охлажденными наружными

поверхностями. При бетонировании тонкостенных конструкций, прискальных блоков нужно максимально поднимать температуру укладываемого бетона с тем, чтобы обеспечить его нормальный температурный режим.

Таблица 5.2

Теплоемкость составляющих бетона

Составляющие бетонной смеси	Теплоёмкость по сравнению со щебнем, %	Теплоёмкость бетонной смеси, % от общей теплоёмкости
Щебень	100	41
Вода	64	26
Песок	58	24
Цемент	28	9

Несмотря на то, что щебень является наиболее теплоемким материалом (табл. 5.2), его нагрев из-за малой удельной поверхности связан со значительными трудностями. В ряде случаев достаточен нагрев воды и песка, так как они составляют около 50% общей теплоемкости смеси. Цемент, как правило, не подогревают. В зимний период повышение температуры бетонной смеси можно достичь за счет следующих мероприятий: на 6–8°C за счет подогрева воды затворения в бойлерах до 60–80°C, на 15–30°C за счет подогрева песка во вращающихся барабанах или пневматической трубе-сушке до 60–80°C, на 15–30°C за счет подогрева крупных заполнителей воздухом или дымовыми газами в бункерах до 30–60°C, на 15–20°C за счет подогрева крупных заполнителей в бункерах или в вакууме до 30–40°C.

5.11. Зола – Унос и её применение в бетонах

Утилизация относится к числу определяющих проблем в решении вопроса использования отходов и попутных продуктов различных отраслей промышленности. Золой, полученные от сжигания углей на ТЭС, применяются в промышленности строительных материалов и изделий на протяжении значительного времени.

За этот период накоплен опыт их утилизации, однако золы до настоящего времени остаются материалом, который требует детального изучения основных свойств с целью определения областей наиболее рационального их использования в строительной индустрии. Гидротехническое строительство на протяжении долгого времени использовало золы. В настоящее время объем утилизации еще отстает от увеличения объемов выхода зол, что приводит к увеличению площадей, отчуждаемых под золоотвалы, происходит загрязнение окружающей среды. Экономическая эффективность использования зол определяется их незначительной себестоимостью, которая складывается из затрат на улавливание и транспортирование их к месту потребления. В дополнение к этому золы имеют высокую дисперсность, содержат ^ стекловидные частицы и активные составляющие, что позволяет получить дополнительный техникоэкономический эффект при наличии вяжущих свойств в сравнении с другими видами вторичного минерального сырья.

5.11.1. Характеристика состава зол и классификация

Зола представляет собой несгоревший пылевидный остаток частиц размером менее 150 мкм., образующийся при сгорании из минеральных примесей твердого топлива. Золой-уносом называется зола, которая удаляется из топки котла сухим способом и улавливается электрофильтрами и другими устройствами. На тепловых электростанциях образуются следующие виды отходов: зола-унос; шлак и золошлаковая смесь. На современных мощных электростанциях организовано раздельное удаление золы и шлака, что повышает однородность материалов и дает возможность использовать их для различных целей. Основной ча-

стью золы (до 70–80%) являются корольки стекла различной величины и окраски, второй компонент – частицы несгоревшего топлива различного состава (3–15%). Кристаллическая фаза представлена зернами кварца, гематита и продуктами глинистого вещества. При нарушении режима работы котлоагрегата содержание несгоревшего топлива в золе повышается и достигает 25–30%. Химический состав зол непостоянен и изменяется в широких пределах в зависимости от вида топлива (табл. 5.3).

При сжигании одного и того же угля в котлах одной станции химический состав золы значительно изменяется. При горении углей температура факела в топке превышает 1700°C. Процесс сгорания угольной пыли продолжается несколько секунд, за которые часть угля не успевает сгореть и уносится вместе с дымовыми газами из топки, а часть оседает со шлаком. В процессе сжигания происходят различные изменения минеральной части угля. Кратковременность пребывания частиц золы в зоне высоких температур приводит к тому, что взаимодействие компонентов происходит на поверхности и в зоне контактов частиц при их столкновении. Большая часть минеральной составляющей золы остается неизменной. Кремнезем при нагревании испытывает ряд полиморфных превращений и при температуре 1720°C плавится. Из застывшего расплава образуется стекло. Изменение химического состава зол в зависимости от вида сжигаемого топлива показано на рис. 5.6. На диаграмме выделены отдельные группы зол для основных угольных бассейнов страны. При высоких температурах в системе $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ возможно протекание химических реакций. Все компоненты золы могут быть разделены на три отдельных группы: термически измененная неорганическая часть, отдельные компоненты которой прореагировали между собой с образованием соединений и стеклофазы; термически преобразованная неорганическая часть, компоненты которой не прореагировали между собой и представлены известью и окисью магния; непрореагировавшая часть, представленная кварцем, кальцитом, полевым шпатом. Исследования вещественного состава зол показывают, что возникающие новообразования обладают вяжущими свойствами. Зола в присутствии извести и при нормальных температурных условиях способна связывать гидрат окиси кальция, образуя при этом устойчивые соединения. Это свойство материала называют гидравлической активностью. Скорость реакции зависит от физико-химических особенностей золы (химического и минералогического состава, количества стекловидной фазы и гранулометрического состава золы).

Активность золы особенно проявляется в условиях тепловлажностой обработки. Институтом УралВТИ предложена классификация золошлаковых материалов, согласно которой золы в зависимости от особенностей химического состава по показателю активности могут быть разделены на три группы: с самостоятельными гидравлическими свойствами; активизирующиеся при водотепловой обработке; инертные. Основным показателем по этой классификации выступает содержание окиси кальция. В соответствии с уменьшением процентного содержания окиси кальция золы разделяются на группы: 1 группа – содержание CaO более 15%:

II – от 15 до 10%:

III – группа менее 10%.

Внутри этих групп золы распределяются по содержанию окиси кальция: общей, свободной, связанной.

Дополнительными характеристиками химико-минералогического состава золошлаковых материалов являются:

$$\text{Модуль основности } Mo = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

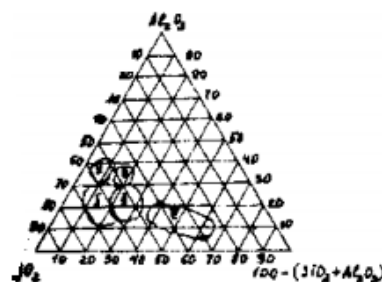


Рис. 5.7. Границы изменения химического состава зол углей различных бассейнов: I – Кузнецкий. II – Донецкий. III – Подмосковный. IV – Канско-Ачинский. V – Экибастузский

Таблица 5.3

Наименование бассейнов и топлива	Содержание окислов в% по массе на сухое вещество								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	В т.ч. CaO _{св}	MgO	SO ₃	R ₂ O	Пп.п.
<i>Каменные угли</i>									
Кузнецкий	49–64	23–28	3–14	3–9	0,5–1,6	1,5–6	0,2–1,2	0,4–1	2–12
Экибастуасский	58–63	22–27	6–10	1–2	-	0,2–1	0,2–0,6	0,6–1	1–3
Донецкий	50–54	23–28	8–15	2–5	-	1–3	0,7–1,6	2–5	2–12
Карагандинский	46–64	22–32	4–8	2–8	-	1–2	0,2–0,6	1–3	1–3
<i>Бурые угли</i>									
Канско-Ачинский	25–47	5–13	7–20	22–45	3–13	4–10	1–3	1–2	1–5
Подмосковный	38–52	25–40	4–20	2–7	1–3	1–4	1–2	1–3	1–3
Уральский	39–54	25–38	5–28	3–8	1–3	1–4	1–2	1–3	1–3
Сланцы Поволжские	34–41	10–14	7–25	25–31	8–11	2–3,6	4–7	1	1–8

$$\text{силикатный модуль } Mc = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$$\text{коэффициент качества } K_k = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO}$$

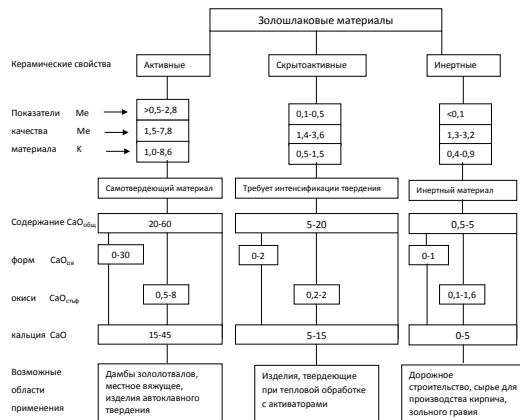


Рис. 5.8. Классификация золошлаковых материалов ТЭС (Урал ВТИ)

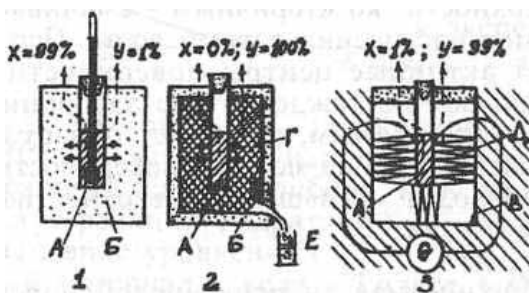


Рис. 5.9. Калориметры: 1 – адиабатический; 2 – изотермический; 3 – теплопроводящий; А – зона выделения теплоты; Б – изолирующая часть; В – внешний хорошо проводящий блок; Г – лед; Д – термпары; Е – градуированный сосуд; Т – термометр; Х – теплота, выделившаяся в окружающую среду

Классификация представлена на рис. 5.7. К первой группе, выделенной на схеме, относятся золы от сжигания канско-ачинских углей, прибалтийских и поволжских сланцев, отдельных торфов, которые имеют высокое содержание общей и свободной окиси кальция и высокое значение модуля основности. Такой материал обладает самостоятельными вяжущими свойствами и может использоваться для изготовления вяжущего, а также как активная добавка в растворы и бетоны. Вторая группа включает золы с суммарным содержанием окиси кальция от 5 до 20 %, в том числе свободной окиси кальция до 2 %; в связи с чем они имеют пониженную активность. Золы этой группы рекомендуются для использования в качестве добавки в пропариваемых бетонах. Третья группа объединяет золы, имеющие высокое содержание кислых окислов (кремнезем и глинозем). Свободная окись кальция в этих золах отсутствует, в связи с чем материал вяжущими свойствами не обладает. Он может использоваться как мелкий заполнитель в бетонах и растворах и как сырьё для производства пористых зольных заполнителей – зольный гравий, аглопорит.

Предлагаемая классификация в зависимости от химического состава зол определяет основные направления их использования в производстве строительных материалов. Золы могут содержать в своем составе свободную окись кальция и гипс. Известь может находиться в пережженном состоянии, так как была подвергнута обработке при температурах 700... 1450 °С. Содержание до 70 % стеклофазы

также определяет значительные вяжущие свойства золы. Отдельные зерна извести покрыты стекловидной оболочкой, что задерживает процесс ее гидратации. Продолжительность гидратации активных компонентов золы в этом случае определяется толщиной оболочки стеклофазы и составляет от 12 часов до 36 месяцев и более. Классификация (табл. 5.3.) отражает особенности преобразования угольных частиц в зольную составляющую. Степень преобразования зависит от полноты выгорания органической части топлива и количества минеральной части в расплаве. Исследования, проводимые в последнее время, не всегда полно отражают специфику поведения активных компонентов, в том числе зольных, в твердеющей системе смешанных вяжущих веществ. Для этих целей удобно использовать энергетические характеристики, получаемые расчетным путем или экспериментальными измерениями. В исследованиях под руководством А. П. Меркина сырьевые компоненты автоклавных бетонов характеризуются термодинамическим потенциалом U :

$$U = U_x + U_n$$

где U_x – термодинамический потенциал химического взаимодействия; U_n – термодинамический потенциал поверхности; $U_n = S_{\text{пл}} \cdot \alpha$, где α – удельная поверхностная энергия; S – площадь поверхности компонента.

Дополнительно для однозначного определения протекания физико-химических процессов вводится величина энергии активации E_a .

$$E_a = 121 - 3,1H,$$

где H – энтальпия кварца, получаемая растворением активных добавок в смеси азотной и фтористоводородной кислот.

Энергия активации характеризует величину минимальной энергии, необходимой активному компоненту для участия в химических взаимодействиях для формирования силикатных связей и фазового состава новообразований при участии кремнеземистых компонентов. По И. И. Циремпилову общие энергетические затраты на процесс твердения могут определяться их уравнением: $E_0 = [E - (E_{\text{э.э.}} + C + N)]$, где $E_{\text{э.э.}}$ – величина экзотермического эффекта реакции гидратации вяжущего; C – энергетический вклад в активацию SiO_2 , химической среды; N – теплота смачивания кремнеземистого компонента.

Прямые определения теплот смачивания, растворения и гидратации различных зол ТЭС выполнялись в НИСИ им. В. В. Куйбышева под руководством профессора Г. И. Книгиной. Все химические процессы сопровождаются поглощением или выделением тепла и характеризуются тепловыми эффектами. Определение количества теплоты, тепловой мощности и теплоемкости производят с помощью специального прибора калориметра. Калориметрический анализ заключается в наблюдении за измерением температуры в ходе эксперимента. Зависимость температуры от времени называется температурной кривой калориметрического опыта. Прямое определение энергии различных физикохимических процессов производится на установках с электронными приборами для выдачи графической информации. Калориметр состоит из ячейки, в которой происходят изучаемые явления, массивной внешней оболочки и термобатарей, соединяющих между собой внутреннюю ячейку и внешнюю оболочку. Термобатареи предназначены для регистрации и передачи теплового потока от сосуда к оболочке или в обратном направлении. При нормальной работе калориметра э. д. с. термобатарей определяется мощностью теплового процесса в реакционной ячейке и не зависит от колебания температуры внешней среды. Регистрация э. д. с. детектирующих термобатарей производится усилителем. При исследовании в рабочую камеру, содержащую 5–10 мл смачивающей жидкости (вода, полярная жидкость), помещают контейнер с исследуемым материалом. В соседней камере находится вещество-эталон, близкое по своим теплофизическим свойствам к изуча-

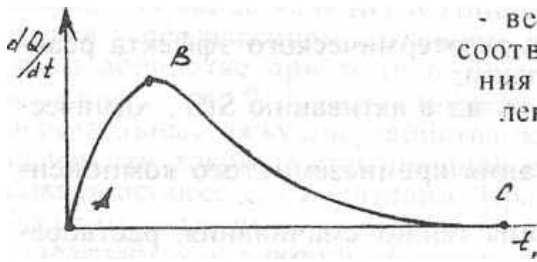


Рис. 5.9. Кривая калибровки

емому материалу. Кривая калибровки микрокалориметра представлена на рис. 5.9. На термограмме выделяются следующие участки:

- экспериментальный нуль;
- момент начала изучаемого процесса (АС);
- вершина термограммы, соответствующая окончанию процесса тепловыделения (точка В);
- участок экспоненциального возврата к экспериментальному нулю.

Площадь термограммы, заключенная в пределах фигуры АВС, соответствует нарушению теплового равновесия в рабочей камере прибора. При осуществлении в калориметре реакции гидратации ее можно представить в общем виде уравнением.

Безводный материал + вода = Гидрат + Q (Дж). Тепловая энергия, выделяемая за время t , определяется количеством прореагировавших за это время частиц. Микрокалориметрический метод анализа позволяет непосредственно получать термокинетические параметры реакции. Тепловыделение активного материала в воде зависит от его способности к гидратации (наличия активной составляющей) и от особенностей поверхности. $Q = Q_1 + Q_2$, где Q – общее тепловыделение реакции, Дж/г1; Q_1 – тепловыделение активного компонента; Q_2 – тепловыделение пассивного компонента. В случае применения по отношению к пробе тепловлажностной обработки $Q_1 \rightarrow 0$ вследствие связывания активного компонента и весь эффект реакции определяется присутствием инертных частиц с той же суммарной поверхностью. Калориметр типа Кальве может быть использован и для изучения таких процессов, как адсорбция. Микроструктура дисперсных силикатных частиц является важной характеристикой, сведения о которой можно получить на основании сорбционных определений. Микроструктурные особенности оцениваются по значениям теплот смачивания в системе «тонкодисперсный материал – вода» и «тонкодисперсный материал – полярная жидкость». Теплота смачивания является разностью полных поверхностных энергий до смачивания

E_1 на границе «твердое тело – газ» и после смачивания E_2 на границе раздела «твердое тело – жидкость»:

$$Q \sim S (E_1 - E_2)$$

где S – эффективная удельная поверхность дисперсного вещества.

Макрокалориметрическое измерение теплот смачивания является наиболее прямым методом изучения взаимодействия на границе раздела фаз. Рассматривались 4 первичные и вторичные процессы взаимодействия материала с водой. К первичным относится смачивание чистой поверхности, ко вторичным – смачивание пробы после режимов насыщения парами воды. Пар постепенно занимает активные центры поверхности, соответственно уменьшая на каждом этапе адсорбции теплоту смачивания, и тем самым, позволяет обнаружить энергетическое распределение мест на поверхности. При адсорбции происходит уменьшение поверхностной энергии на величину

$$\nabla \sigma = \sigma_0 - \sigma_1,$$

где σ_0 – поверхностная энергия чистой поверхности в момент ее образования; σ_1 – поверхностная энергия той же системы, покрытой адсорбированным слоем водяного пара данной степени уплотнения.

Образцы исследуемого материала выдерживают при относительном давлении пара $P/P_0 = 0,53$ и $0,88$. При относительном давлении $P/P_0 < 0,53$ происходит практически полное покрытие всех первичных активных центров на поверхности цементного камня, в этом случае возможно Оценить величину внутренней поверхности цементного камня При давлении

$P/P_0 = 0,88$ поры полностью заполняются капиллярно-конденсированной водой. Теплота смачивания при этом режиме оценивает поверхность скелета цементного камня, сосредоточенную возле микропор. Средняя полярность поверхности может быть определена на основании теплот смачивания, когда для этого используются органические жидкости. Отношение тепловыделения в полярных жидкостях к теплотам смачивания в неполярных веществах характеризует особенности поверхности исследуемого вещества. Выбор типа калориметра определяется целями эксперимента, длительностью процесса, величиной теплового эффекта, температурой, физикохимическими особенностями реагентов, требуемой точностью измерения. Существует класс калориметров интеграторов, определяющих количество теплоты (адиабатический, термосный, изотермический) и калориметров-осциллографов, предназначенных для измерения тепловой мощности. Требования к калориметру, вытекающие из задач технологии вяжущих веществ и бетонов, основаны на необходимости получить характеристики теплоты гидратации (Q) и измерения тепловыделения во времени: dQ/dt .

Принцип дифференциальной калориметрии заключается в конструктивных особенностях и возможности изучения кинетики тепловыделения вяжущих веществ и бетона в процессе твердения. Такой калориметр состоит из двух идентичных сосудов, теплоизолированных друг от друга слоем воздуха и размещенных в общей гнезде-оболочке, (рис. 5.10). Сосуды находятся в одинаковых условиях теплообмена с окружающей средой, что обеспечивает проведение точных калориметрических измерений без учета теплообмена. В зависимости от массы и объема исследуемых проб, приборы подразделяются на дифференциальные калориметры и микрокалориметры. Дифференциальные калориметры используются для изучения тепловых эффектов при гидратации активных компонентов: твердение цементный паст, растворов и бетонов. Все эти параметры важны при выполнении бетонных работ в массивных гидротехнических сооружениях и разработке научных основ зимнего бетонирования. Дифференциальные калориметры позволяют проводить изучение тепловых эффектов, направленных на решение ряда вопросов технологии бетонных работ. Однако, их точность не всегда достаточна. В этом плане наиболее приемлемым является метод дифференциальной микрокалориметрии. Микрокалориметр позволяет проводить прямое определение физико-химических процессов. Тепловыделение – результат комплекса физико-химических процессов взаимодействия дисперсного порошка с дисперсной жидкой средой. В общем случае полагают, что суммарный тепловой эффект Q_T – складывается из суммы: $Q_T = Q_{см} + Q_x + Q_{кр} - Q_a + Q_c - Q_r$, где $Q_{см}$ – теплота смачивания (адсорбции) воды исходным порошком; Q_x – теплота химической реакции; $Q_{кр}$ – теплота кристаллизации новообразований; Q_a – теплота адсорбции воды продуктами новообразований; Q_c – теплота сольватации; Q_r – теплота растворения. Скорость тепловыделения отражает суммарную скорость, интенсивность физико-химических процессов гидратации, выражаемую в единицах теплоты, отнесенной к единице времени, t . Показатели тепловыделения позволяют оценить термохимические свойства вяжущего вещества и кинетику процесса гидратации. Типичные зависимости

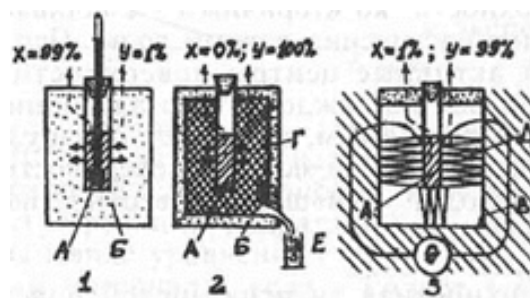


Рис. 5.10. Калориметры: 1 – адиабатический; 2 – изотермический; 3 – теплопроводящий; А – зона выделения теплоты; Б – изолирующая часть; В – внешний хорошо проводящий блок; Г – лед; Д – термодатчики; Е – градуированный сосуд; Т – термометр; X – теплота, выделившаяся в окружающую среду

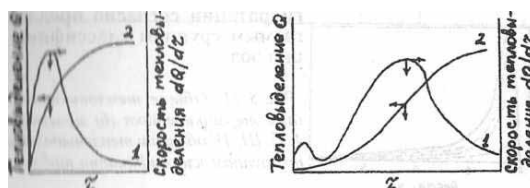


Рис. 5.11. Калориметрические кривые медленного и быстрого твердения 1 – $dQ/dt = f(t)$; 2 – $Q = f(t)$

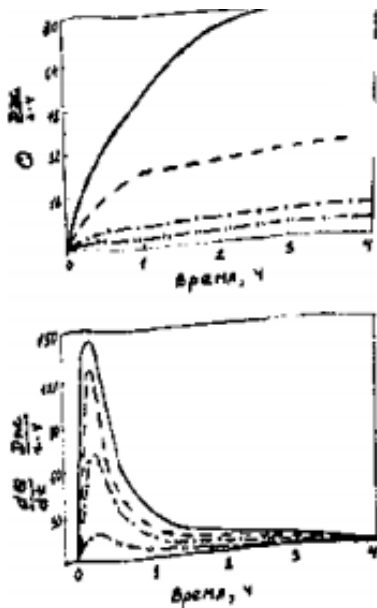


Рис. 5.12. Общее тепловыделение (а) и термокинетика (б) золы-уноса I, II, III, IV области тепловыделений по группам классификации табл. 5.5.

$Q = f(t)$ и $dQ/dt = f(t)$ приводятся на рис. 5.11. Они отражают два наиболее характерных процесса гидратации, называемых термокинетическими.

Интегральные и дифференциальные временные зависимости тепловыделения позволяют не только оценить тепловые эффекты реакции гидратации, но и выделить характерные их области. Микрокалориметрическая классификация зол, предложенная Г. И. Книгиной и М. В. Балахниным, позволяет сделать полную оценку зол как сырья для производства строительных материалов, так как она основывается на физико-химической характеристике вещественного состава и некоторых показателях физико-химической активности зол. В микрокалориметрической классификации золы-уноса тепловых электростанций от сжигания каменных и бурых углей (табл. 5.4) применен принцип их качественной оценки по трем характеристикам, определяемым на микрокалориметре – суммарная теплота смачивания и гидратации в воде, теплота смачивания в неполярной жидкости толуоле, коэффициент гидрофильности – отношение теплот смачивания в воде и толуоле (K_r) и дополнительными химическими характеристиками – отношением окислов SiO_2/Al_2O_3 , величиной нерастворимого остатка в 3 % HCl и содержа-

нием $CaO_{бщ}$ и $CaO_{св}$. Микрокалориметрические характеристики зол по теплотам смачивания и гидратации являются достаточно объективным показателем их физико-химической активности. На рис. 5.12 приведены микрокалориметрические кривые термокинетики золы-уноса в координатах «скорость тепловыделения – время». Области под кривыми количественно соответствуют общей теплоте смачивания и гидратации согласно предлагаемым группам классификации зол.

Таблица 5.4

Классификация минералогического состава каменноугольных зол электростанции

Органическая фаза	Неорганическая фаза		
	стекловидные компоненты		кристаллические компоненты
	агрегированные частицы	неорганические частицы	
Содержание микрокомпонентов в % по объему			
1–22	25–85	8–57	0,2–20
1	2	3	4
Коксовые остатки – фюзенизированные, витренизированные Полукоксовые остатки – фюзенизированное, витренизированное	Неоднородные-форма неправильная, состоит из стекловидных, кристаллических и органических частиц; форма правильная, шарообразная; состоит из стекловидной оболочки и ядра с включением микрокомпонентов. Однородные – стекловидные, состоят из остроугольных, нитеобразных частиц	Стекло А-бесцветное, прозрачное, N = 1,525...1,635, шарообразное, остроугольное: Стекло В-желтое N = 1,635...1,700 шарообразное; Стекло С-бурое, красное N = 1,700–1,734 шарообразное; стекло Д-черное магнетитовое, шарообразное	Кварц, полевой шпат, образования, кристаллизующиеся из расплава $3Al_2O_3 \cdot 0,2SiO_2 \cdot 2CaO \cdot SiO_2 \cdot CaO \cdot SiO_2 \cdot CaO \cdot Al_2O_3$

Таблица 5.5

Микрокалориметрическая классификация золоноса ТЭС

Группа	Физико-химическая активность	Микрокалориметрия		
		Теплота смачивания		Коэффициент гидрофильности $K_n = Q_v/Q_t$
		Водой Q_v	Толуолом Q_t	
I	Высокая	33,6–84	4,2–6,3	5–15
II	Средняя	10,5–33,6	2,1–4,2	2,5–8
III	Пониженная	4,2–10,5	1,05–2,1	2–5
IV	Низкая	0,42–4,2	менее	0,4–5

Группа	Физико-химическая активность	Химические характеристики					
		Содержание СаО в % по массе		$K = Al_2O_3 + CaO/SiO_2$		Поглощение $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, мг/20г	Нерастворимый остаток в 3 % HCl по массе
		свободной	общей	Общей для золы	Для стекловидной фазы и нерастворим, остатка		
I	Высокая	до 18	До 32	0,8–1,0	0,64–0,58	120–160	3–10
II	Средняя	До 8	До 20	0,6–0,8	0,58–0,52	80–120	8–14
III	Пониженная	0–2,5	До 15	0,4–0,6	0,52–0,46	36–80	10–18
IV	Низкая	0–1,5	До 10	<0,4	<0,46	<36	16–24

Вторая микрокалориметрическая характеристика – теплота смачивания золы в неполярной жидкости – толуоле. является ее физической структурной константой как адсорбционно-активного твердого тела при данной дисперсности и изменяется в пределах от 0,25 до 6,3 Дж/ кг.

Третья микрокалориметрическая характеристика зол – коэффициент гидрофильности (по П. А. Ребиндеру), численно равный отношению теплоты смачивания в воде к таковой в неполярной жидкости, ($K_r = Q_v/Q_t$) объединяя первые два показателя, является довольно полной структурно – фазовой характеристикой материала, отражающей физические и физико-химические (хемосорбционные) особенности материалов. Коэффициент гидрофильности зол изменяется в пределах от 15 до 0,4.

Дополнительные химические характеристики по классификации – содержание в золе СаО общей и свободной и величина нерастворимого остатка в 3 % HCl.

На основе предлагаемой классификации приводятся практические рекомендации по применению золы-уноса ТЭС при условии допустимого содержания СаО_{св}, и п.п.п.:

I группа – для производства зольных и смешанных вяжущих (золоцементных) с предварительной обработкой юлы возможно применение кислотных и щелочных активизаторов твердения;

II группа – для добавки в растворы и бетоны в качестве вяжущего взамен части цемента с предварительной обработкой золы. Возможно применение щелочных активизаторов твердения;

III группа – как комплексная добавка в растворы и бетоны взамен части цемента и мелкого заполнителя, для производства зольного аглопорита;

IV группа – как добавка в растворы и бетоны взамен части мелкого заполнителя, для производства зольного оглопорита.

Микрокалориметрическое исследование позволяет более объективно оценить потенциальные возможности зол-уноса ТЭС как сырья для производства строительных материалов и конкретно решать вопросы их практического применения, обработки, подготовки, введения добавок активизаторов твердения и т.п.

Универсальная классификация зол-уноса твердого топлива разработана Е. А. Галибиной. Одним из показателей в классификации (табл. 5.4) является коэффициент основности зол, ранее предложенный П. И. Боженковым, для оценки промышленных отходов и попутных про-

дуктов различных отраслей производства. Коэффициент основности учитывает химический состав сырья, динамику реакций в твердом состоянии и учитывает процесс минералообразования:

$$K_{осн} = \frac{(CaO + 1,03MgO + 0,6R_2O_3) - (0,55Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,7SO_3)}{0,93SiO_2}$$

Вторым показателем в классификации является соотношение в золе Al_2O_3 / SO_3 , указывающее на возможность образования гидроалюминатов, гидросульфалюминатов и гидрокарбонатов кальция в зависимости от условия твердения зол. Кроме этих показателей в классификации учтены коэффициент плавкости, общее содержание извести в золе, содержание стекловидной фазы. Таким образом, в классификации отражена связь между вещественным составом зол и процессом их твердения в зависимости от термодинамических параметров и даны конкретные рекомендации по их использованию в качестве вяжущего для бетонов и растворов.

5.11.2. Строительно-технические свойства зол ТЭС

Основными строительно-техническими свойствами зол являются объемная масса, удельный вес частиц (плотность), гранулометрический состав, удельная поверхность, гидравлическая активность. По этим показателям возможно предварительно оценить пригодность золы для ее использования в бетонах, которая затем уточняется с привлечением данных фазового и физико-минералогических анализов золы.

Объемная масса зависит от абсолютной плотности частиц и суммарной пористости, плотность от ее вещественного состава. Гранулометрический состав золы зависит от вида и условий сжигания топлива, конструкции топki котла, конструкции золоулавливающих устройств и их состояния в процессе эксплуатации. Гранулометрический состав определяется содержанием частиц различной крупности и является важным показателем, по которому определяют пригодность зол при их использовании в бетонах.

Дисперсность золы характеризуется величиной остатков на ситах, фракционным составом частиц и удельной поверхностью, общей или по фракциям (табл 5.5.).

Абсолютная плотность зол ТЭС находится в пределах от 1,95 до 2,9 г/см³, насыпная плотность от 620 до 1150 кг/м³, удельная поверхность от 850 до 4700 см л/г. Гидравлическая активность, определенная по поглощению окиси кальция из насыщенного раствора извести, составляет 1015 мг/г для зол средней активности или молотых и 4060 мг/г для высокоактивных зол.

Гидравлическая активность зол, определенная по прочности пропаренных зольных образцов, составляет от 0,3 до 10 МПа. Автоклавная обработка приводит к повышению прочности на 15–20%. Высокая удельная поверхность некоторых зол значительно увеличивает водопотребность золобетонов. Водопотребность зол характеризуется их водопоглощением и составляет в среднем 35–45 % по массе.

Гранулометрический состав зол оценивается по остатку на сите N008 и составляет в среднем от 3 до 20 % по массе. Количество средней фракции золы (размер зерен от 20 до 85 мкм) составляет 30–42 %, мелкой фракции (размер зерен менее 20 мкм) 45–57 %.

5.11.3. Общие требования к золам

Зола по виду сжигаемого угля делится на антрацитовую, каменноугольную и бурогоугольную. Как добавка для бетона, она должна удовлетворять техническим требованиям, указанным в табл. 5.6.

Зола, добавляемая к цементу, должна обеспечить равномерность изменения объема смешанного вяжущего при испытании образцов кипячением в воде.

В случае содержания в золе свободной окиси кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) или окиси магния (MgO) в количествах, превышающих указанные в таблице, смешанное вяжущее должно выдержать испытание в автоклаве при 2,0 МПа (20 кгс/см²).

Смешанное вяжущее с суммарным содержанием в золе $\text{CaO} + \text{MgO}$ до 12 %, предназначенное для бетонов сборных железобетонных конструкций внутренних частей зданий, должно обеспечить равномерность изменения объема при испытании образцов кипячением в воде. Содержание в золе MgO не должно превышать 5 %, $\text{CaO}_{\text{св}}$ – 7 %; количество золы в смешанном вяжущем не должно превышать 20 % по массе.

Таблица 5.6

Технические требования к золе

№ п/п	Наименование показателя	Виды бетонов		
		Гидротехнический	Тяжёлый и лёгкий	
			армированный	неармированный
1	Содержание $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ в % по массе, не менее а) для антрацитовой и каменноугольной б) для бурогоугольной	70 50	70 50	70 50
2	Сернистые и сернокислые соединения в пересчете на SO_3 в % по массе, не более	3	3	3
3	Свободная окись кальция ($\text{CaO}_{\text{св}}$) в % по массе, не более	2	3	4
4	Окись магния (MgO) в % по массе, не более	5	5	5
5	Углекислые остатки (п. п. п.) в % по массе, не более: а) в антрацитовой б) в каменноугольной в) в бурогоугольной	5 5 3	15 7 5	20 10 5
6	Влажность в % по массе, не более	3	3	3
7	Удельная поверхность в см ² /г не менее	2800	2800	2800
8	Остаток на сите № 008 в % по массе, не более	15	15	15

Примечания: 1. Для легких бетонов марок 100 и ниже допускается применение золы с удельной поверхностью не менее 1500 см² г. 2. При содержании в золе свободной окиси кальция выше указанного в таблице допускается применение золы после ее специальной подготовки (помол, активизация) или применение подогрева бетонной смеси.

В остальных случаях количество вводимой золы не должно превышать 50 % по массе в смешанном вяжущем для бетонов, применяемых при изготовлении промышленных и гражданских конструкций и 25 % для гидротехнического бетона. Для бетонов, к которым предъявляются требования по морозостойкости выше $\text{Мрз } 50$, введение добавки зола допускается только после проведения специальных исследований на морозостойкость.

При использовании для бетонов заполнителей, содержащих реакционноспособные минералы (опал, халцедон, кремнистые сланцы, опоку, вулканические туфы и др.), возможность применения смешанного вяжущего (цемент+зола) должна быть обоснована специальными экспериментальными исследованиями для предотвращения щелочной коррозии бетона.

Если к бетонным или железобетонным конструкциям предъявляются требования технической эстетики, применяемая зола не должна содержать щелочных окислов: каменноугольная и антрацитовая более – 3 %, а бурогоугольная более – 1,5 %.

При использовании некоторых зол в бетонах естественного твердения следует учитывать возможное снижение прочности при сжатии (до 20–30 %) в ранние сроки (28–60 суток) и последующее выравнивание прочности и более поздние сроки (90–180 суток) по сравнению с бетоном аналогичного состава без добавки золы.

5.11.4. Применение зол в производстве тяжелых бетонов

5.11.4.1. Применение зол в смешанных вяжущих

Золы могут использоваться в качестве добавки к цементам в бетонах различных марок. Высокая дисперсность частиц золы и особенности химического состава обуславливают эффективность ее введения при замене части вяжущего. Благоприятный гранулометрический состав и сферическая форма отдельных частиц приводит к тому, что зола дополняет собой общую гранулометрию бетонной смеси. Такие бетонные смеси имеют пониженное воздухововлечение и поверхностную пористость. В этом случае происходит повышение подвижности бетонной смеси и становится возможным снизить общую водопотребность бетона. Повышение дисперсности используемой золы приводит к увеличению содержания сферических частиц, вызывающих снижение внутреннего трения и дополнительно увеличивающих подвижность смеси. В результате комплексного влияния золы повышается качество формируемых изделий, а расход цемента снижается.

Замена части цемента золой на ранней стадии твердения приводит к снижению прочности бетона соответственно увеличению процента вводимой золы. Но в дальнейшем, при наличии благоприятных условий, зола проявляет свою гидравлическую активность и вступает во взаимодействие с продуктами гидратации вяжущего. Это приводит к повышению плотности структуры бетона и увеличению его прочности. На поздних сроках твердения смешанного вяжущего полнота взаимодействия золы неуклонно повышается, в результате чего образуются новые продукты гидратации. Все это находит свое конечное отражение в прочностных показателях, особенно при растяжении и изгибе, что является одним из основных преимуществ цементов с добавкой золы. Одновременно введение золы позволяет снизить тепловыделение при твердении, уменьшить усадку бетона. В результате активного участия золы в процессе гидратации и повышения плотности структуры увеличивается водостойкость бетона на поздних сроках твердения, коррозионная стойкость и долговечность. В соответствии с этим использование зол для замены части вяжущего должно найти широкое применение в производстве бетона и железобетона.

При сооружении Усть-Илимской ГЭС применялся гидротехнический шлакопортландцемент с содержанием до 40 % зол и шлаков назаровских бурых углей.

По результатам экспериментальных исследований существуют различные мнения о влиянии золы на морозостойкость бетонов. Отдельные исследования отмечают ее положительное значение. Наряду с этим известны результаты, по которым отмечается снижение морозостойкости бетонов при введении в их состав золы. Имеющиеся противоречия могут быть объяснены особенностями основных свойств использованных зол и различным количеством золы в составе бетонной смеси. При введении золы с большой водопотребностью и значительной водоудерживающей способностью дополнительно образуются крупные поры и полости, снижающие морозостойкость бетона. Однако, наряду с этим, образуются продукты гидратации, имеющие большую водостойкость, так как содержащиеся в золе силикаты взаимодействуют с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующейся при гидратации C_3S и C_2S . Совместно с этим процессом увеличивается количество условно-замкнутых пор. Окончательную оценку значения золы в каждом конкретном случае можно получить путем испытания бетонов на замораживание и оттаивание.

В настоящее время установлено, что тяжелые бетоны с добавкой золы могут применяться во всех тех случаях, где используются бетоны без добавок. Особенно эффективно использование золы в бетонных, подвергаемых действию пара при атмосферном или повышенном давлении. Количество вводимой золы определяют на основе оценки свойств самой золы, цемента, качества применяемых заполнителей, условий твердения и конечных требований к бетону. Однако, несмотря на отмеченные положительные свойства, зола используется в бетонах в крайне малых количествах из-за значительного колебания своего состава и свойств. Исходя из учета необходимости охраны окружающей среды, требуется повышать процент использования зол в народном хозяйстве, в том числе и при введении в бетон.

При добавке в тяжелые бетоны золы бурого угля Канско-Ачинского бассейна для бетонов М 100 с осадкой конуса 13 см возможно заменить песок золой на 15% по весу и тем сократить расход цемента на 15%; для бетонов М 200 с осадкой конуса 4–10 см зола заменяет 10% песка и 20% цемента; для жестких бетонов М 200 с осадкой конуса 0–1 см и бетонов М 300 с осадкой конуса 3–5 см возможно заменить золой 10% песка и 15% цемента. Физико-механические показатели бетонов соответствуют предъявленным требованиям, при этом значительно улучшается удобоукладываемость бетонных смесей, структура бетона, повышается плотность за счет рациональной гранулометрии мелкого заполнителя (зола + песок).

В технологии производства бетонных смесей существенных изменений не требуется. На рис. 5.13 показан вариант подачи золы при изготовлении тяжелых золобетонов.

При введении больших дозировок золы (более 150 кг на 1 м³ бетона) возможно уменьшить расход цемента на 100 кг и более, но в этом случае для высококальциевых рекомендуется применять дополнительные технологические приемы, способствующие ускорению процесса гидратации свободной окиси кальция, содержащейся в золе (особые режимы перемешивания, горячие бетонные смеси, активизация и помол золы). Бетоны с добавкой золы морозостойки и обеспечивают стойкость арматуры против коррозии.

ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева выполнил комплекс исследований по бетонам плотины Саяно-Шушенской ГРЭС. Изучены свойства бетонов марок до 300 с F100 и W8 при использовании в качестве добавки к цементу золы– уноса Красноярской ТЭЦ. Зола рекомендована для использования в бетон при ее домоле с целью увеличения дисперсности зольных частиц и обеспечения более полной гидратации СаОсв.

5.11.4.2. Использование зол в качестве гранулометрической добавки

Зола может использоваться в бетонах в качестве гранулометрической добавки, так как она хорошо вписывается в общую гранулометрию бетонной смеси и позволяет регулировать содержание частиц определенной крупности. По размерам своих частиц зола занимает промежуточное положение между песком и цементом. При использовании грубодисперсных зол в составе бетонной смеси становится возможным заменить частицами золы недостающие по размерам промежуточные частицы между песком и цементом. С введением в состав бетона высокодисперсных зол возрастает количество частиц, соизмеримых по своим размерам с ча-

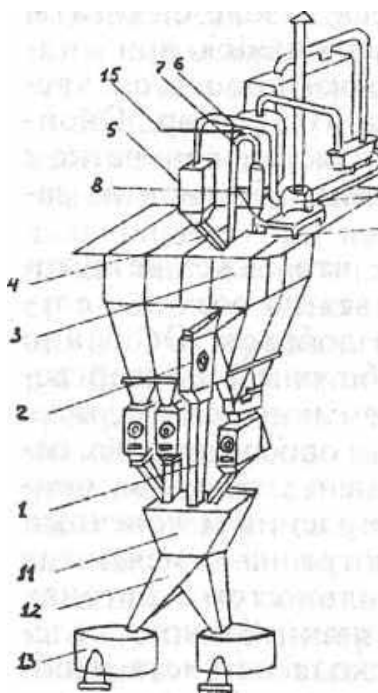


Рис. 5.13. Технология подачи золы при изготовлении тяжелых бетонных смесей

1 – течка от дозатора золы; 2 – дозатор для золы; 3 – бункер для золы; 4 – течка от фильтра в бункер; 5 – фильтр рукавный; 6 – воздухопровод от фильтра к вентилятору; 7 – воздухопровод от циклона в бункер; 8 – циклон; 9 – вентилятор центробежный; 10 – течка из циклона в бункер; 11 – приемная воронка с перекидным клапаном; 12 – течка в бетоносмеситель; 13 – бетоносмеситель принудительного перемешивания; 14 – золопровод; 15 – цементопровод

стицами цемента. Это обстоятельство имеет большое значение при использовании мелких песков в качестве заполнителя бетона. Высокая пустотность и удельная поверхность таких песков требует увеличения расхода цемента для создания вокруг зерен песка необходимой цементной пленки, а также для заполнения большого объема пустот между частицами песка. Цемент в этом случае является гранулометрической добавкой, от которой не требуется проявления вяжущих свойств. Равноценной заменой в этом случае выступают частицы золы, которые близки по своим размерам к цементным. Использование золы позволяет снизить расход цемента на ту его часть, которая расходуется на заполнение пустот между частицами песка. В этом случае введение золы равноценно введению цемента. Конечным результатом применения зол в составе растворов и бетонов на мелких песках является снижение себестоимости выпуска продукции и улучшение структуры получаемого материала.

Результаты многих исследований указывают на влияние дисперсности золы, которая выражается удельной поверхностью, на прочностные характеристики бетонов и растворов. Экспериментальные данные указывают на необходимость увеличения дисперсности золы, так как это может повысить механические показатели бетона. Наряду с этим И. А. Иванов отмечает, что одновременно с увеличением физико-химической активности при помоле золы наблюдается возрастание усадки и ползучести. Способом улучшения зернового состава золы он считает введение укрупняющих добавок (мелкие пески, шлаки).

Применение зол в виде микрозаполнителей в цементно-песчаных смесях позволяет увеличить прочность на 15–35%. Однако при этом необходимо учитывать экономичность использования зол в составе бетона.

5.11.4.3. Строительные растворы с добавкой золы

В строительных растворах особенно эффективно применение активных зол, например, буроугольных. В кладочных растворах М50, М75, М100 возможно сократить расход цемента и заменить пластификаторы золой бурого угля при сохранении требуемых физико-механических характеристик раствора.

Эффективно применение в растворах химических добавок хлористого кальция или магния, когда вводится зола бурого угля. При введении золы в состав растворной смеси вместо части песка увеличивается ее удобоукладываемость, поэтому возможно не применять различные пластификаторы (известь, глину, подмыльный щелок). Удобоукладываемость растворов значительно улучшается, растворная масса более однородна, оседание смеси не наблюдается. В табл. 5.7 и 5.8 приведены составы растворов и их прочность при сжатии.

Таблица 5.7

Составы строительных растворов с золой бурого угля

Марка раствора	Расход материалов на 1 м ³ раствора			
	Цемент, кг	Зола, кг	Песок, кг	Вода, %
50	152	153	1415	300
75	212	141	1320	285
100	264	141	1340	285

Таблица 5.8

Прочность строительных растворов с золой бурого угля

Марка растворов	Предел прочности при сжатии в возрасте 23 суток (кг/см ²) при относительной влажности среды			Коэффициент размягчения
	65 ± 10%	выше 90%	в воде	
50	56,0	55,0	52,0	0,9
75	78,0	76,0	76,0	0,94
100	105,0	108,0	107,0	0,96

Таким образом, в строительных растворах возможно сократить расход цемента на 20%. Морозостойкость раствора не менее М 25. Растворные смеси при введении добавки золы бурого угля в количестве 20% от веса цемента обладают хорошей удобоукладываемостью без введения пластификаторов глины, извести, подмыльного щелока.

6. ДРЕВЕСНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Древесные материалы и изделия полностью или преимущественно состоят из древесины. Достоинства натуральной древесины – ее относительно высокая прочность, небольшая средняя площадь, малая тепло- и звукопроводность, легкая обрабатываемость и способность соединяться (при помощи шпонок, гвоздей, болтов, клеев, врубок). Однако, древесина обладает и рядом недостатков, к числу основных относятся: формоизменяемость при колебаниях влажности, горючесть, подверженность загниванию, анизотропность свойств в связи с особенностями строения. Качество и долговечность древесных материалов улучшаются за счет широко применяемых новых видов древесины, пропитанных и склеенных синтетическими смолами.

Исходя из совокупности положительных свойств и распространенности древесина широко используется в практике гидротехнического строительства, особенно для малых и средних объектов. К их числу относятся перемычки, плотины, эстакады, временные мостовые переходы. В условиях массового применения бетона, как основного материала строительства, дерево используется для рациональной организации выполнения бетонных работ, изготовления инвентарной опалубки, устройства лесов и т.д. Использование комплекса средств механизации позволяет на основе древесины выпускать конструкции сборных быстровозводимых зданий и сооружений, используемых на объектах гидротехнического строительства.

6.1. Строение древесины

Дерево как многолетнее растение состоит из ствола, корней и кроны. Между древесиной и внутренней частью коры – лубом при жизни располагается образовательная ткань (камбий) тонким кольцевым слоем. Камбий откладывает в сторону коры клетки луба и внутрь ствола клетки древесины. Весной образуются тонкостенные клетки, летом и ранней осенью – более мелкие толстостенные. На торцевом разрезе древесина состоит из отдельных годовичных концентрических слоев, располагающихся вокруг сердцевинной трубки.

Сердцевинная трубка, включающая собственно сердцевину и первичные древесные ткани, располагается по всей длине ствола. Для нее характерно рыхлое строение, низкая прочность, склонность к быстрому загниванию.

Клетки древесины имеют различную форму и размеры, которые определяются выполняемыми ими функциями. Соответственно различают: проводящие клетки – сосуды и трахеиды; запасные клетки (древесную и лучевую паренхиму); опорные клетки – либриформ у лиственных и трахеиды поздней древесины у хвойных. Сосуды в виде трубочек с широкой полостью и тонкими стенками проходят вдоль ствола. На боковых поверхностях располагаются поры, посредством которых сосуды сообщаются между собой. Трахеиды являются вытянутыми замкнутыми клетками. Оболочки клеток имеют спиральные утолщения, повышающие их прочность, на оболочках которых располагаются поры. Через эти поры отдельные клетки сообщаются друг с другом. В растущем дереве вода по сосудам и трахеидам движется от корней к листьям, перенося растворенные в ней минеральные и органические вещества. Хвойные породы не содержат сосудов, трахеиды выполняют одновременно роль проводящих и опорных клеток.

Древесная паренхима имеет тонкостенные клетки шаровидной или кубической формы. В них откладываются запасы питательных веществ (крахмал, сахар и т.д.). Клетки расположены последовательными вертикальными рядами, могут

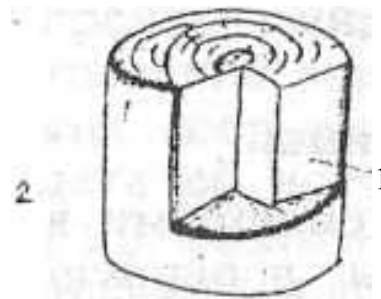


Рис. 6.1. Основные разрезы древесного ствола 1 – торцевой; 2 – радиальный; 3 – тангенциальный

располагаться горизонтальными по радиусу, в этом случае они образуют так называемые сердцевинные лучи. По ним перемещаются питательные вещества от луба по направлению к сердцевине.

Опорными клетками лиственных пород являются либо риформы, которые имеют веретенообразную форму и достаточно толстые оболочки. Повышение средней плотности и прочности древесины для лиственных пород связано с увеличением содержания либриформ, тогда как для хвойных пород это связано с присутствием поздних трахеид.

Торцевой срез древесного ствола наглядно демонстрирует годовичные слои. Разделяется ранняя (весенняя) часть годового слоя, включающая тонкостенные широкие клетки меньшей плотности со светлой окраской в отличие от поздних клеток. Поздняя часть имеет повышенную плотность и прочность при более темной окраске. Годовичные слои представляют чередование светлых и темных полос. При тангенциальном разрезе они видны продольными извилистыми и параболическими полосами, которые разделены узкой темной полосой наружного края годовичного слоя.

Для отдельных пород древесины центральная часть ствола имеет выраженную темную окраску, называемую ядром. Периферийная светлая древесина называется заболонью. Изменение цвета для клеток ядровой части древесины связано с отложением дубильных и других красящих веществ. Примером ядровых пород являются дуб, ясень, сосна, лиственница и др. Породы древесины, однородные по цвету называются заболонными. К таковым относят клен, березу, ольху, осину и др.

6.2. Основные породы древесины

Основными видами древесины, применяемыми в строительстве, являются хвойные породы, в первую очередь, сосна, лиственница, ель. Особенно ценна для гидротехнического строительства лиственница. Из лиственных выделяют дуб, ясень и др., лучшим из которых для гидротехники является дуб. Мягкие лиственные породы осина, тополь, ольха, липа могут применяться только в элементах временных зданий и сооружений, а также для устройства опалубок, лесов, подмостей и т. п.

Сосна – имеет прямой ствол длиной до 40 м при 80–100 см в диаметре. Она обладает высокой прочностью при небольшой объемной массе. Долговечна как на воздухе, так и под водой. Широко распространена в строительстве для несущих конструкций, свай, столбов, фанеры и т. д.

Лиственница – представляет собой дерево высотой до 50 м при диаметре до 170 см. Для древесины характерны большая твердость и прочность. Лиственница долговечна при повышенной влажности (в земле и под водой), что предопределило ее широкое применение в гидротехническом строительстве, мостостроении. Не допускается для изготовления несущих гвоздевых конструкций.

Ель имеет ствол, достигающий длины до 50 м при диаметре до 100 см. Древесина белая, мягкая и легкая. В сравнении с сосной и лиственницей содержит значительно меньше смолистых веществ, которые как естественные антисептики предохраняют древесину от загнивания. При повышенной влажности легко загнивает. Применяется для тех же целей, что и древесина сосны, но с учетом недостаточной ее стойкости к загниванию в условиях повышенной и, особенно, переменной влажности.

Береза – имеет твердую и тяжелую древесину. Легко загнивает, особенно при повышенной влажности. В строительстве применяется ограничено, в основном для производства фанеры.

Дуб – отмечен древесиной высокой прочности и красивой текстуры. Длительное погружение под воду приводит древесину в состояние повышенной плотности и прочности

(мореная древесина). Применяется для изготовления ответственных конструкций в гидротехнических сооружениях, мостостроении, для ответственных деталей несущих конструкций (шпонок, подкладок и т.д.), различных столярных изделий. Остальные породы древесины представляют меньшую ценность.

6.3. Физические и механические свойства древесины

6.3.1. Химический состав древесины

Оболочки клеток состоят в основном из целлюлозы высокомолекулярного углевода состава $(C_6H_{10}O_5)_{11}$. Макромолекулы целлюлозы эластичны и сильно вытянуты. Дополнительно в состав клеток входят лигнин и другие высокомолекулярные углеводы, а также минеральные соли. Химический состав сухой древесины всех пород следующий, (%):

углерод – 49,5;

водород – 6,3;

кислород + азот – 44,2;

минеральные вещества (преимущественно соли кальция) – 0,2–1,7.

При сгорании древесины минеральные вещества образуют золу.

6.3.2. Физические свойства древесины

Влажность древесины. Физико-механические свойства древесины определяются ее влажностью. В связи со сложным капиллярно-пористым строением в древесине присутствует несколько форм связи воды с твердой фазой.

Стенки клеток древесины, состоящие из мицелл целлюлозы ультрамикроскопических размеров, имеют гидратные оболочки. Влага может присутствовать в полостях самих клеток, в межклеточном пространстве, в стенках клеток в составе мицелл, а также в межмицеллярном пространстве. Вся влага древесины делится на капиллярную и гигроскопическую. Первый вид находится в полостях клеток и межклеточном пространстве, а второй – в стенках клеток. При сушке влажной древесины первоначально удаляется капиллярная влага. Объем и механические свойства древесины на этом этапе сушки не изменяются. В процессе удаления гигроскопической влаги происходит сближение мицелл, что определяет уменьшение объема древесины и увеличение прочности.

Влажность древесины W выражается в процентах от массы сухой древесины и вычисляется по формуле:

$$W = \frac{m_b - m_l}{m_l} 100,$$

где m_b – масса влажной древесины; m_l – масса абсолютно сухой древесины.

Состояние древесины, при котором отмечается предельное содержание в ней гигроскопической влаги с одновременным отсутствием капиллярной, называют точкой насыщения волокон или пределом гигроскопичности. Для различных пород древесины он составляет от 25 до 35 %. в среднем принимается значение 30 %. Различают следующие влажностные состояния древесины:

мокрая – соответствует длительному выдерживанию в воде и имеет влажность более 100 %;

влажная - влажность более 20 %; *воздушно-сухая* – соответствует длительному хранению на открытом воздухе и имеет влажность 15–20 %;

комнатно-сухая – влажность 8–13 %;

абсолютно сухая древесина.

Действительное содержание влаги в древесине определяется температурой и влажностью окружающего воздуха и самой древесины.

Древесина способна поглощать водяные пары или отдавать влагу в зависимости от реальных условий. Длительное хранение древесины на воздухе при постоянной температуре и влажности обеспечивает установление гигрометрического равновесия. В этом состоянии упругость водяных паров в воздухе и капиллярах древесины выравнивается. Изменение температурно-влажностных условий внешней среды приводит к колебанию содержания влаги в древесине. Изменения происходят до момента установления динамического равновесного содержания влаги, соответствующего меняющимся параметрам окружающей среды. Перемещение влаги в древесине приводит к изменению размеров деревянных деталей конструкций в условиях реальной эксплуатации зданий и сооружений.

Покрытие поверхностей деревянных частей водо- и воздухонепроницаемыми составами: красками, лаками, мастиками, пленками, способствует сохранению постоянства размеров и свойств деревянных конструкций. Это в полной мере касается деревянных элементов гидротехнических сооружений, от которых требуется высокая долговечность во влажных условиях работы.

Удаление капиллярной влаги в процессе сушки и начинающаяся после этого потеря гигроскопической, заключенной в стенках клеток, приводит к уменьшению объема древесины. Для древесины выделяют линейную и объемную усушку, вычисляемую по формуле:

$$y = \frac{a_2 - a_1}{a_1} 100,$$

где Y – усушка, %; a_2 – линейные размеры, или объем влажного образца древесины, соответственно см или см³; a_1 – линейные размеры или объем образца, высушенного до абсолютно сухого состояния, соответственно см или см³.

Неоднородность строения древесины приводит к различию линейной усушки в противоположных направлениях. Вдоль волокон усадка строительных древесных пород минимальна и составляет около 0,1 %. В радиальном направлении усадка увеличивается и составляет 3–6 %, а в тангенциальном направлении она максимальна и равняется 7–12 % для различных пород древесины.

Различные величины усушки и разбухания древесины по основным направлениям сечения ствола вызывают появление внутренних напряжений. При значительных значениях эти напряжения могут вызвать коробление и появление трещин в лесоматериалах. Для устранения этих дефектов необходимо применение комплекса мер, среди которых основной является сушка. Влажность используемой древесины должна соответствовать условиям ее службы, а при колебаниях температурно-влажностных условий окружающей среды необходимо специально защищать древесину от увлажнения.

6.3.3. Плотность древесины

Абсолютная плотность древесины в силу близкого вещественного состава всех пород изменяется примерно в интервале 1450–1560 кг/м³. Средняя плотность древесины в сухом состоянии для различных древесных пород колеблется в пределах 0,38–1,1 г/см³ и находится в прямой взаимосвязи с влажностью. Принято определять среднюю плотность древесины при равновесной влажности в момент испытания $W = 12 \pm 1$ %: ~ в абсолютно сухом состоянии.

Средняя плотность древесины от нулевой влажности до 30 % -ной (предел гигроскопичности) определяется по формуле:

$$\rho_0^{12} = \rho_{w_0} [1 + 0,01(1 - K_y)(12 - W)],$$

где ρ_{w_0} – средняя плотность древесины при влажности 12 %; ρ_{w_0} – средняя плотность древесины в момент испытаний; W – влажность древесины; K_y – коэффициент объемной усушки: для березы, бука, граба, лиственницы $K_y = 0,6$; для остальных пород $K_y = 0,5$.

При влажности более 30 % средняя плотность древесины вычисляется по формуле:

$$\rho_{12} = \frac{\Delta \rho w_0}{1 + 0.01W},$$

где Δ – коэффициент, зависящий от породы древесины (для березы, лиственницы $\Delta = 1,222$, для остальных пород $\Delta = 1,203$).

Средняя плотность характеризует такие важнейшие строительно-технические свойства древесины, как предел прочности при сжатии и статическом изгибе, теплопроводность и т. д.

6.3.4. Теплопроводность и теплоемкость древесины

Теплопроводность древесины, как высокопористого материала, относительно невелика. Для абсолютно сухой древесины она увеличивается с повышением средней плотности. Зависит от ориентации волокон по отношению к направлению движения теплового потока, вдоль волокон она примерно в 2 раза больше, чем поперек волокон. Для ели и сосны вдоль волокон $\lambda = 0,35$ Вт/м $^{\circ}$ С, поперек $\lambda = 0,17$ Вт/м $^{\circ}$ С. Теплопроводность древесины повышается с увеличением влажности, температуры. Удельная теплоемкость абсолютно сухой древесины, Дж/кг $^{\circ}$, определяется по формуле

$$C = 1566 + 2,76341t;$$

где t – температура, $^{\circ}$ С.

6.3.5. Механические свойства древесины

Для древесины, как материала с анизотропным волокнистым строением, имеют большое значение прочностные показатели вдоль и поперек волокон (при растяжении вдоль и поперек волокон различие в 20–30 раз, а при сжатии в 5–10 раз). Прочность зависит от породы дерева, объемной массы, наличия пороков, особенно от влажности в пределах 0...30 %. Поэтому определение механических свойств древесины всегда производят с учетом ее влажности, направления действия нагрузки.

Для древесины определяют: прочность при сжатии вдоль волокон – образцы имеют прямоугольную форму с размером 20х20 мм и длиной волокон 30 мм. Прочность рассчитывают по формуле $R_w = R_{раз} / a_v$, где $R_{раз}$ – разрушающая нагрузка, МПа; a и v – размеры поперечного сечения, см ^{2} .

Кроме того:

- прочность при сжатии поперек волокон;
- прочность при растяжении вдоль волокон;
- прочность при статическом изгибе;
- прочность древесины при скалывании;

Механические свойства древесины зависят от влажности. Результаты испытаний древесины, полученные при фактической влажности, пересчитывают к прочности стандартной 12 % влажности по формуле

$$R_{12} = R_w [1 + \alpha (W - 12)]$$

где R_{12} , R_w – предел прочности образцов соответственно при 12 % и фактической влажности в момент испытаний; α – поправочный коэффициент на влажность, показывающий, на сколько изменяется прочность при изменении влажности на 1 %.

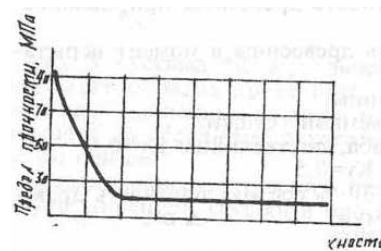


Рис. 6.2. Влияние влажности древесины на прочность при сжатии вдоль волокон

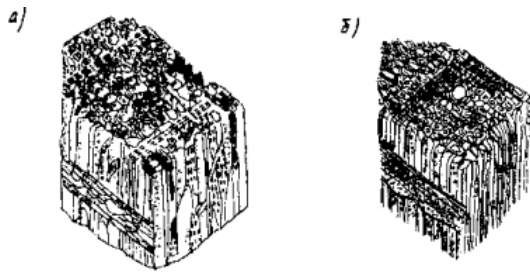


Рис. 6.3. Микроструктура древесины:
а – сосны; б – березы

1, 2, 7 – сердцевинные лучи; 3 – годовые слои; 4 – поздние трахеиды; 5 – вертикальный смоляной ход; 6 – ранние трахеиды; 8 – окаймленные поры; 9 – либроформ; 10 – сердцевинные лучи; 11 – сосуды

Величина α при сжатии и изгибе составляет 0,04, при скалывании – 0,03.

Предел прочности древесины с влажностью, на момент испытания равной или большей предела гигроскопичности, пересчитывают к влажности 12 %-ной по формуле:

$$R_{12} = R_w K_{12}$$

где K_{12} – пересчетный коэффициент при влажности 30 %, имеющий различные значения для разных пород и вида испытаний.

Физико-механические свойства древесины основных строительных пород, приведены в табл. 6.1.

Стандартные методы испытания позволяют выполнять сравнение прочности древесины одной или разных пород.

Однако фактическая прочность реальной строительной древесины (досок, брусьев, бревен) из-за наличия тех или иных дефектов не может быть оценена таким образом. Поэтому при нормировании допускаемых напряжений для древесины устанавливают относительно большие коэффициенты запаса. В силу этих же оснований сорт лесоматериалов устанавливают не по прочности образцов, а на основании осмотра материала и оценки имеющихся в нем пороков.

Таблица 6.1

Физико-механические свойства древесины

Порода	Объёмная масса, кг/м³	Предел прочности, МПа вдоль волокон при			
		сжатии	растяжении	скалывании	изгибе
Хвойные породы					
Лиственница	660	64,5	125	9,9	111,5
Сосна	500	48,5	103,5	7,5	86
Ель	445	44,5	103	6,9	79,5
Пихта	375	39	67	6,4	68,5
Лиственные породы					
Дуб	690	57,5	123	10,5	107,5
Берёза	630	55	168	9,3	109,5
Липа	495	45,5	121	0,6	88
Осина	495	42,5	125,9	6,3	78

Таблица 6.2

Механические свойства древесины хвойных и лиственных пород (влажность 15 %)

Порода	Объёмная масса, кг/м ³	Предел прочности, МПа, вдоль волокон при				
		сжатии	изгибе	растяжении	скалывании	
					радиальном	тангенциальном
Лиственница	680	52	97	129	11,5	12,5
Сосна	530	44	79	115	7	7,5
Ель	460	42	77,5	122	5	5
Кедр	440	35	64,5	78	5,5	6
Пихта	390	33	58,5	84	5	6,5
Дуб	720	52	94	129	8,5	10,5
Бук	650	46	94	129	10	13
Берёза	640	45	100	120	8,5	11
Липа	540	39	68	116	7	8
Осина	500	37	77	111	6	8

6.4. Пороки древесины

Пороками являются отклонения строения и недостатки отдельных участков древесины в сравнении с нормальными образцами. Конечным итогом являются понижение качества древесины и ограничения по ее применению. Пороки возникают в процессе роста деревьев, в этом случае они называются первичными; образующиеся при хранении древесины или при ее службе в зданиях и сооружениях – вторичные.

Вид, место расположения, размер дефектов определяют сорт строительной древесины и ее применение в каждом конкретном случае.

Первичные пороки древесины

Сучковатость – является наиболее распространенным пороком. Сучки делятся на здоровые и пораженные гнилью (загнившие, гнилые и табачные). Такие сучки понижают механические свойства и могут являться очагом распространения грибковой инфекции. Для изготовления конструкции рекомендуется применять древесину со здоровыми сросшимися сучками. Число и размер сучков определяется сортом древесины. Для ответственных мелких строительных деталей (шпонок, нагелей, вкладышей) используют плотную древесину, не имеющую сучков и других пороков.

Косослой – характеризуется косым расположением волокон в стволе. Это заметно снижает прочность при отклонении направления волокон от оси ствола более чем на 5 см на 1 м длины. Повышает усушку и коробление древесины.

Свилеватость – выражается в волнистом и путанном расположении волокон древесины. Свилеватость сопровождается понижением прочности древесины на изгиб при одновременном повышении сопротивления сжатию и раскалыванию.

Сбежистость – характеризуется уменьшением диаметра ствола в направлении от комля к вершине более чем на 2 см на каждый 1 м длины. При наличии этого дефекта понижается выход пиломатериалов, а в отдельных случаях и сортность древесины из-за образования искусственного косослоя.

Завиток – определяет порок, связанный с местным искривлением годичных слоев ствола древесины. Прочность древесины в этом случае понижается, в частности, при сжатии вдоль волокон и при изгибе.

Вторичные пороки древесины вызываются жизнедеятельностью различных грибов. Некоторые из них могут поражать растущее дерево, в этом случае они относятся к первичным. Большая опасность для долговечности деревянных конструкций и частей инженерных сооружений связана с гнилью. Этот порок поражает древесину при ее службе в зданиях и сооружениях. Процесс разделяется на три стадии: споры грибов при проникновении в древесину прорастают тонкими нитями, образуя сплетения – мицелий. При переходе нитей из одной клетки в другую остаются круглые отверстия в оболочках клеток, образуются участки частично разрушенной древесины со светлой или темной окраской. Разрушение клеточных оболочек приобретает значительный объем. Древесина становится губчатой и мягкой. Цвет становится более светлым (белая гниль) или темный (бурая гниль).

Грибы, вызывающие загнивание древесины, могут существовать только в условиях повышенной влажности (более 20 %) и положительной температуры, превышающей 60 °С. Загнивание древесины непосредственно в зданиях вызывается домовыми грибами. Различают белый домовый, настоящий домовый гриб, домовый пленочный и др.

Червоточины – вызваны действием насекомых, которые поражают как растущее дерево, так и наземные части деревянных конструкций. К их числу относятся: мебельный точильщик, домовый точильщик, термиты. Личинки жуков мебельного и домового точильщиков проделывают в древесине отверстия и ходы диаметром мм и более, при этом домовый точильщик поражает в основном наружные деревянные конструкции зданий, стропила, чердачные

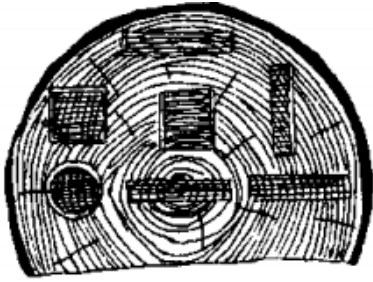


Рис. 6.4. Изменение формы поперечного сечения пиломатериалов при усушке

балки. Термиты, встречающиеся в Закавказье и Средней Азии, разрушают деревянные части построек, железнодорожные шпалы, столбы телеграфные и древесину на складах, образуя ходы в материале.

Трещины – образуются из-за неравномерности высыхания древесины при неоднородном ее строении. У круглого леса и пиломатериала трещины усушки образуются на торцах. Интенсивность испарения влаги с торцов в несколько раз больше, чем с боковых поверхностей. Трещины усушки направлены в основном по радиусу, наиболее слабым местом является участок между продольными волокнами и сердцевинными

лучами. Характер и размер определяется скоростью сушки, площадью сечения, породой древесины. Сортность древесины с присутствием трещин понижается. В их присутствии прочность, особенно на растяжение поперек волокон, а так же на скалывание вдоль волокон значительно снижает свое значение.

6.5. Лесоматериалы и изделия для гидротехнического строительства

6.5.1. Виды лесных материалов

В строительстве лесные материалы применяются в виде круглого леса, пиломатериалов, полуфабрикатов, строительных деталей и изделий.

Круглые лесные материалы. Круглый лес является отрезком древесного ствола с корой и без коры. Сучья отрублены, торцы правильно оформлены. Классифицируются в зависимости от диаметра в верхнем отрубе ствола на бревно (диаметр более 14 см), подтоварник (8–14 см) и жерди (диаметр 3–7 см).

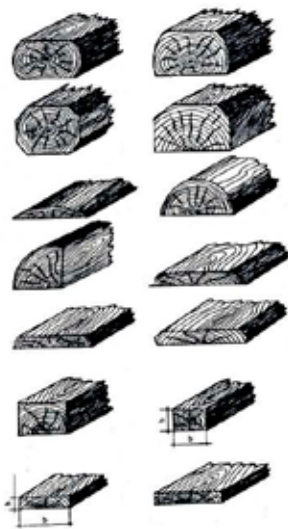


Рис. 6.5. Сортамент пиломатериалов а – необрезные и полуобрезные; б – обрезные; в – элементы доски; 1 – шпалы (Лежень и брусковая); 2 – брус четырехгранный; 3 – брус полуобрезной (с обзолом); 4 – горбыль; 5 – пластина; 6 – четвертина; 7 – доска с острым обзолом; 8 – доска с тупым обзолом; 9 – доска полуобрезная; 10 – брус острокантный; 11 – брусок ($b < 2h$); 12 – доска обрезная ($b > 2h$); 13 – тасть; 14 – шорец; 15 – кромка; 16 – ребра

Бревна в свою очередь разделяются на строительные и пиловочные. Строительные бревна изготавливают из стволов хвойных пород и предназначены для несущих строительных конструкций гидротехнического, промышленного строительства, для элементов свайных опор и пролетных строений деревянных мостов. Пиловочные бревна изготавливают из хвойных и лиственных пород и предназначены для получения различных пиломатериалов. Круглые лесоматериалы в зависимости от вида и количества пороков делят на четыре сорта. Гниль не допускается. На несущие строительные конструкции применяются бревна первого и второго сорта. Пиломатериалы по размерам поперечного сечения делят на брусья, доски, бруски, шпалы и др.

Брусья имеют ширину и толщину, превышающую 100 мм. Брусья строительные изготавливают в основном из хвойных пород. Делятся на четырехконтные, т.е. пиленные со всех сторон, и двухконтные, опиленные с двух взаимно противоположных сторон.

Досками – являются пиломатериалы с толщиной 90–70 мм и менее при отношении ширины к толщине более

При отношении ширины к толщине менее 2 и толщине не более 100 мм пиломатериал называют брусками. Доски и бруски делятся на обрезные и необрезные. Распиловка дерева по оси ствола приводит к получению пластин. распиловка в четырех взаимно перпендикулярных направлениях образует четвертины. Отходы при распиловке бруса называют горбылем. Длина пиломатериалов хвойных пород составляет 6,5 м, а лиственных от 4,5 до 5 м. Пиломатериал применяется для изготовления опалубочных щитов монолитных бетонных гидротехнических сооружений.

Полуфабрикаты и строительные детали выступают в виде строганных и шпунтованных досок и брусков. На одной из сторон имеет шпунт (выемку), а на другой – гребень (выступ), что позволяет плотно приподнять доски по кромкам. Применяются для настилки полов, обшивки стен и потолков, а также для устройства перегородок. К профилированным строганным заготовкам относятся плинтуса для заделки углов между полом и стенами, поручни, наличники и т. д.

Строительная фанера получается склеиванием по толщине тонких слоев шпона. Шпон в виде тонких листов древесины до 0,3 мм толщиной получают на лущильных станках путем срезания непрерывной ленты с вращающегося предварительно распаренного кряжа. Фанера включает от трех и более слоев шпона, склеенных между собой со взаимно перпендикулярным расположением волокон древесины. Для повышения водостойкости используют фенолформальдегидные смолы (фанера марки (ФСФ). Для фанеры средней водостойкости (марка ЯГиФ Б А) применяют карбамидные клеи. Наиболее часто используют древесину березы, бука и сосны. Фанеру повышенной водостойкости применяют для изготовления несущих конструкций, в том числе для f условий гидротехнических работ с повышенной влажностью. Фанера применяется как материал для опалубки при бетонировании, а также как строительный материал. Промышленность выпускает фанерные трубы диаметром 100–300 мм под давлением до 1,2 МПа. Развитие заводской технологии привело к появлению строительных элементов и сборных конструкций домов. Наиболее прогрессивными являются клееные деревянные конструкции. Склеивание производят водостойкими фенолоформальдегидными клеями. Клееные конструкции соединяются без помощи врубок, шпонок, гвоздей и т. п. они являются более долговечными, более трещиностойкими. при их изготовлении можно применять пиломатериалы пониженного качества. Гидротехническое строительство широко использует готовые элементы домов для быстрого строительства рабочих поселков.

6.6. Долговечность древесины и ее повышение

Эффективным предупреждением загнивания деревянных конструкций является сушка древесины. В ходе этого процесса достигается влажность, при которой прекращается жизнедеятельность низших микроорганизмов (грибов). После этого выполняется надежная защита древесины от увлажнения в процессе эксплуатации. Влага удаляется путем испарения или выпаривания. Сушкой полностью удаляется капиллярная и часть гигроскопической влаги древесины.

Сушка бывает воздушной, камерной, контактной, в электрическом поле и нагретых жидких средах.

При *воздушной* сушке у древесины, уложенной в штабеля на открытом воздухе достигается влажность воздушно-сухого состояния, то есть влажность 15–20 %. Достоинства воздушной сушки состоят в простоте процесса, низких затратах на устройство складов, отсутствие затрат на подогрев теплоносителя. Недостатками являются длительность процесса, трудность регулирования, возможность поражения древесины грибами. Продолжительность воздушной сушки определяется климатическими условиями (температура и влажность воздуха), плотностью древесины, размерами лесоматериала.

Сушка в *камерных сушилках*, где в качестве теплоносителя используется подогретый воздух или дымовые газы является более эффективной, чем воздушная. Процесс поддается

полной регулировке, возможно получить высушивание лесоматериалов любой влажности. Режимы работы камерных сушилок зависят от породы древесины и размеров пиломатериалов. Древесные материалы должны равномерно высыхать по всему сечению, в сечениях не должны появляться трещины и коробления.

При постоянных увлажнениях деревянной конструкции, а также изготовленной из сырой и плохо просушенной древесины, требуются мероприятия по увеличению сроков ее службы. В целях предохранения от загнивания требуется консервация древесины. Для этих целей используют антисептики.

Механизм воздействия антисептиков основан на ликвидации грибов или создании сред, в которых жизнедеятельность грибов становится невозможной. Антисептики применяются в виде водных растворов, антисептических паст, на основе водорастворимых антисептиков: маслянистых антисептиков; антисептиков, применяемых в органических растворителях.

К водным антисептикам относятся растворы фтористого натрия NaF , кремнефтористого натрия Na_2SiF_6 , хлористого цинка ZnCl_2 . Они работают при условии их надежной защиты от увлажнения и вымывания окружающей водой.

Для деревянных элементов, находящихся на открытом воздухе, в земле и воде, применяют маслянистые антисептики. Основой выступают каменноугольные, полукоксовые и сланцевые масла. Маслянистые антисептики употребляют для антисептирования свай, деревянных элементов мостов, эстакад и подводных сооружений. Горючесть и резкий запах не позволяют их применять для антисептирования деревянных конструкций и изделий внутри помещений.

Антисептическая обработка разделяется на поверхности, когда органические антисептики наносятся на поверхность: пропитку в горяче-холодных ваннах. Деревянные элементы подвергают обработке маслянистыми антисептиками в высокотемпературных горяче-холодных ваннах. На первом этапе деревянные элементы погружают в ванну с нагретым до 110–120 °С маслом или расплавленным петролатом. В этой среде происходит прогрев и сушка древесины, затем она переносится в «холодную» ванну с маслянистым антисептиком при температуре 60–70 °С. Выдержка 6–8 часов. Антисептик при таком чередовании температур проникает в древесину на большую глубину, обеспечивая высокий защитный эффект.

Еще более высокий защитный эффект достигается пропиткой в цилиндрах под давлением. Применяются маслянистые и водорастворимые антисептики. Древесина загружается в автоклав, где создается вакуум. После этого подают водный раствор антисептика, подогретый до 60 °С. Давление в автоклаве повышается до 0,7 МПа и более. Обработку проходят балки, лаги, подкладки и т. д.

Пастами пропитывают древесину, которую невозможно обработать под давлением или в ванне. Паста наносится на поверхность защищаемого элемента различными способами – гидропультом, краскопультом, кистью, погружением.

Сохранность древесины от выгорания обеспечивается огнезащитной обработкой различными составами. Различают поверхностную обработку огнезащитными составами, обмазками, покрытие асбоцементными листами и др. Эффективным направлением является обработка древесины водными растворами огнезащитных солей в автоклаве под давлением или горяче-холодных ваннах. После этой обработки выполняют покрытие древесины атмосфероустойчивой огнезащитной краской.

Вещества, применяемые для защиты деревянных конструкций от возгорания называют антипиренами. К ним относятся фосфорнокислый аммоний, сернокислый аммоний и др.

При высоких температурах древесина, пропитанная антипиренами не горит, а медленно разлагается. Некоторые из антипиренов при нагревании древесины плавятся и образуют защитные пленки. Тем самым закрывается доступ кислороду или выделяются негорючие газы, оттесняющие кислород воздуха от поверхности древесины. Огнезащитными покрытиями выступают различные огнестойкие краски, которые подразделяются на атмосферостойкие, влагостойкие и не влагостойкие.

7. КРОВЕЛЬНЫЕ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Кровлю из рулонных материалов делают из нескольких слоев, составляющих кровельный ковер. Вниз ковра укладывают подкладочные материалы (беспокровные), а в верхний слой – покровные материалы, имеющие слои из тугоплавкого битума (дегтя) и посыпки:

крупнозернистой (К), мелкозернистой (М):

пылеватой (П),

Допускается выпуск с чешуйчатой посыпкой (РКЧ – рубероид).

Выпускают основные и безосновные рулонные материалы. Основные – путем обработки основы (кровельного картона, асбестовой бумаги, стеклоткани и др.) битумами, дегтями и их смесями. Безосновные получают в виде полотнищ определенной толщины, применяя прокат из смесей, составленных из органического вяжущего (чаще битума), наполнителя (минерального порошка или измельченной резины) и добавок (антисептика, пластификатора).

Рубероид изготавливают, пропитывая кровельный картон расплавленным легкоплавким битумом с последующим покрытием с одной или обеих сторон тугоплавким нефтяным битумом с наполнителем и посыпкой. Кровельный картон получают из тряпья, бумажной макулатуры и древесной целлюлозы. Крупнозернистая плотная посыпка не только повышает атмосферостойкость рубероида, но и придает ему привлекательный вид.

7.1. Технология производства рубероида.

Технология производства рубероида состоит из трех основных этапов:

– пропитка картона: 2 – нанесение покровной массы: 3 – посыпка полотна минеральным материалом.

На рубероидном агрегате после размотки и склеивания кровельный картон, предварительно обработанный горячей битумной массой, поступает на пропитку сначала в ванну, а затем в камеру. На поверхность пропитанного битумом полотна картона наносят с двух сторон покровный слой. Покровную массу приготавливают смешиванием при температуре 173–200°C.

Толщина минерального покровного слоя на лицевой поверхности кровельного рубероида должна быть не менее 0,6 мм, а на нижней поверхности – 0,2 мм.

Заключительным этапом является нанесение посыпочных материалов. Крупнозернистая посыпка должна содержать не менее 90% зерен крупнее 0,63 мм, через сито N025 должно проходить не более 7% материалов. В пылевидной посыпке не менее 93% зерен составляют фракции 0,05–0,63 мм. Посыпочные материалы имеют температуру 100–125°C.

Качество рубероида оценивается комплексом показателей: отношением массы пропиточного битума к массе сухого картона; массой покровного состава, водопоглощением; водонепроницаемостью; механической прочностью; гибкостью.

Улучшенные свойства имеет рубероид с эластичным покровным слоем. Покровный материал содержит в покровном слое 4–6% крошки, предварительно растворимой в битуме БНК 90/40, благодаря чему повышается атмосферостойкость и эластичность (применяется в холодных климатических условиях).

В зависимости от назначения кровельный (К), подкладочный (П) рубероид делят на марки:

Для северных районов выпускают рубероид РЭМ-350 с эластичным покровным слоем битума, модифицированным полимерами.

Наплавленный рубероид – кровельный материал. Его главное преимущество в том, что при устройстве кровли наклейка осуществляется без применения кровельной мастики – расплавлением утонченного нижнего покровного слоя (пламенем горелки).

Пергамин – рулонный беспокровный материал, получаемый пропиткой кровельного картона расплавленным нефтяным битумом с температурой размягчения не ниже 40°C. Является подкладочным материалом под рубероид и используется для пароизоляции.

С применением дегтевых изготавливают кровельный и гидроизоляционный толь. Производство толя осуществляют аналогично рубероиду. Толь кровельный с крупнозернистой посыпкой ТКК-350 и ТКК-400 получают с применением покровного слоя из тугоплавких дегтевых продуктов с наполнителем. На лицевую сторону впрессовывают слой крупнозернистой посыпки, на нижний – мелкозернистой или пылевидной, (табл. 7.1).

Толь гидроизоляционный после пропитки дегтевыми материалами обрабатывают мелкозернистой минеральной посыпкой – песком.

Толь применяют для кровель временных сооружений, пароизоляции в качестве подкладочного материала, гидроизоляции.

Таблица 7.1

Физико-механические характеристики толя

Наименование	Нормы для марок					
	ТГ-300	ТГ-350	ТКП-350	ТКП-400	ТКК-350	ТКК-400
Температура размягчения	45–48	48	38–42	38–42	26–28	26–28
Средняя разрывная нагрузка, Н	450	5890	2740	2940	2740	2940
Водопоглощение по массе, %		20				12
Водонепроницаемость при давлении						

Стеклорубероид и стекловолок – рулонные материалы, полученные путем двустороннего нанесения битумного вяжущего (битумно-резиновый) на стекловолоконный холст или на стекловолок с покрытием сплошным слоем посыпки. Различают:

С-РК – крупнозернистой посыпкой.

С-РЧ – чешуйчатой посыпкой.

С-РП – пылевидной мелкозернистой.

Гидростеклоизол – новый гидроизоляционный рулонный материал, предназначенный для гидроизоляции железобетонных обделок.

Гидростеклоизол состоит из:

стеклоосновы;

покрыт с двух сторон слоем битумной массы;

наполнители – 20 %: молотый тальк, магнезит, пластификатор.

Рулон 10 м. шириной 0,85–1,15 м. Разрывная нагрузка 735Н (75 кгс)

Гидростеклоизол клеивают без применения мастик равномерным оплавлением его поверхности пламенем газовоздушной горелки.

Асфальтовые маты получают путем покрытия предварительно пропитанной стеклоткани с обеих сторон гидроизоляционной битумной мастикой. Используется для деформационных швов.

Фольгоизол – рулонный двухслойный материал из тонкой рифленой тол. и. покрытой с нижней стороны защитным битумно-резиновым составом. Используется для кровель, герметизации стыков. Длина 10 м. ширина 1.0 м, окраска голубая.

Фольгорубероид – гидроизоляционный материал из алюминиевой фольги, покрытой с обеих сторон битумной мастикой. Применяют для подземных сооружений и ГТС.

Гидроизол – рулонный беспокровный материал, полученный путем пропитки асбестового картона нефтяным битумом. Применяют для устройства изоляции в подземных сооружениях в ГТС.

Бртол – изготавливают, прокатывая массу, полученную смешиванием битума, дробленой резины, асбестового волокна и пластификатора. Стоек к серной и соляной кислотам. Применяется для защиты от коррозии.

Изол – безосновный рулонный гидроизоляционный и кровельный материал, изготавливаемый прокаткой ре–зинобитумной композиции, термомеханической обработкой девулканизированной резины, нефтяного битума, минерального наполнителя, антисептика и пластификатора. Изол долговечнее рубероида более чем в два раза. Толщина – 2 мм для изоляции ГТС. резервуаров. антикоррозионной защиты.

7.2. Мастики

Мастики – смесь нефтяного битума или дегтя с минеральными наполнителями. Для получения мастик применяют: пылевидные наполнители (измельченный тальк, магнезии, известняк, мел, цемент, золы твердые, доломит, волокнистые наполнители).

Мастики подразделяются: а) по виду – битумные, битумно-резиновые, битумно-полимерные; б) по способу применения – горячие до 160 °С, битумные – 130 °С, дегтевые холодные содержат растворитель при температуре ниже 5,0 °С.

Приклеивающие мастики применяют для склеивания рулонных материалов при устройстве многослойных кровельных покрытий, оклеичной гидроизоляцией.

Битумные кровельные материалы (рубероид, пергамент) приклеивают битумной мастикой, а дегтевые (толь) – дегтевой.

7.3. Гидроизоляционные асфальтовые мастики

Применяют для устройства литой и штукатурной гидроизоляции и в качестве вяжущего для изготовления плит. Горячие битумно-минеральные мастики изготавливают из битума с добавкой 30–64 % минерального наполнителя в зависимости от назначения. Их используют для заливочной гидроизоляции швов ГТС. Холодные асфальтовые мастики получают, смешивая битумно-известковую пасту с минеральным наполнителем без нагрева компонентов. Их применяют для штукатурной гидроизоляции и заполнения деформационных швов. Гидрофобный газоасфальт изготавливают на основе битумно-известковой пасты с добавкой 10–50 % портландцемента и алюминиевой пудры в качестве газообразователя. Используют в конструкциях кровельных панелей и теплогидроизоляции трубопроводов.

Битумно-резиновые мастики применяют для изоляции подземных стальных трубопроводов. Получают сплавлением битума, порошка резины.

7.4. Асфальтобетоны

В последнее время в каменнотесных и земляных плотинах широкое применение стали находить асфальтобетонные диафрагмы, размещаемые внутри сооружения. В мировой практике известно более 30 крупных сооружений с асфальтобетонными диафрагмами, например, плотина *Финетерта* высотой 82 м, *Лй-Айленд* высотой 109 м в Гонконге, в Запорожье высотой 32 м и др. Использовался асфальтополимербетон в шламоотвалах и золоотвалах при сооружении дамб на Ворошиловградской ГРЭС. Балаковском химзаводе. Краматорском заводе, Николаевском глиноземистом заводе и др. Примеры см. рис. 7.2.

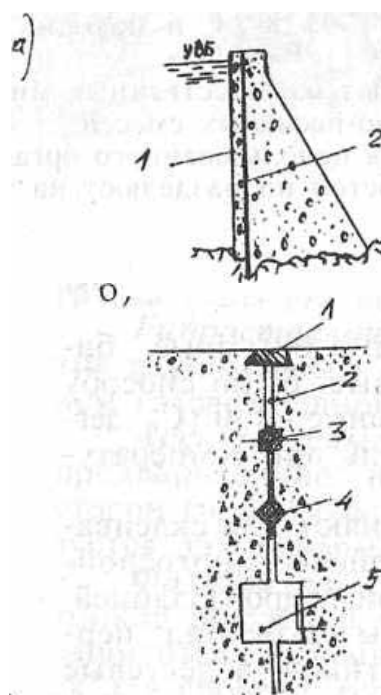


Рис. 7.1. Расположение уплотнений в швах 1 – наружное уплотнение; 2 – основное вертикальное уплотнение; 3 – медный лист; 4 – асфальт; 5 – дренаж

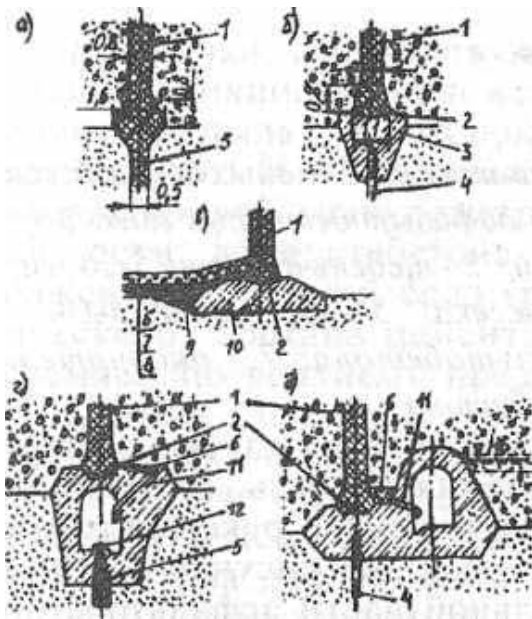


Рис. 7.2. Контрфорсная плотина Лох-Слой (Шотландия) из сборных железобетонных конструкций 1 — сборный свод, составленный из 13 железобетонных арок; 2 — сборные железобетонные блоки водослива; 3 — поперечное сечение балок водослива

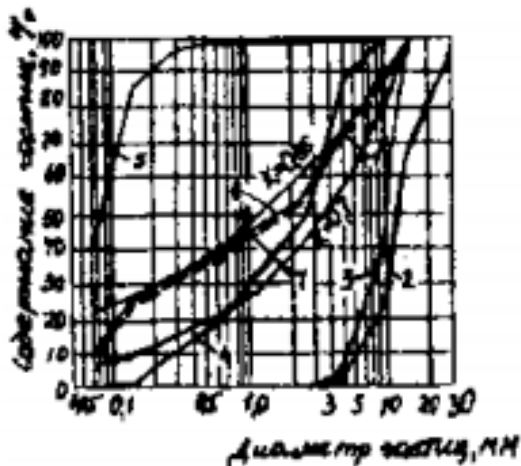


Рис. 7.3. Гранулометрические составы исходных минеральных материалов и минеральной части асфальтобетонных смесей: 1 — пределы кривых плотных смесей; 2 — щебень фракций 5–20 мм; 3 — щебень фракций 5–15 мм; 4 — высевка; 5 — цементная пыль; 6 — предварительный состав асфальтобетона; 7 — окончательно рекомендуемый состав асфальтобетона

Для противофильтрационных покрытий в гидросооружениях применяется асфальтобетон или асфальтополимербетон, отличающийся от дорожных асфальтобетонов большим содержанием битума и наполнителя и использованием полимербиту много вяжущего. Состав асфальтобетона подбирается с таким расчетом, чтоб эта смесь обладала хорошей уплотняемостью в разогретом состоянии, обеспечивала бы устойчивость экрана или диафрагмы, их водонепроницаемость и трещиностойкость.

Асфальтобетоны подразделяются на два типа:

I-й тип — изготавливают из качественных порошков, удовлетворяющих ГОСТ 9128–84, и материалов горных плотных пород;

II-й тип — приготавливают из естественных минеральных порошков и гравийно-песчаных смесей.

В зависимости от свойств использованного органического вяжущего, асфальтобетон подразделяют на три марки А, Б, В.

А — включает асфальтобетоны, изготавливаемые на вязких дорожных битумах; Б — к ним относятся улучшенные асфальтовые бетоны (модифицированные битумы); В — модифицированные битумы, свойства которых определяются по свойствам полимерной добавки.

Физико-механические свойства асфальтобетонов определяются на образцах цилиндрической формы:

для песчаного асфальтобетона $d = h = 50,5$ мм;

для мелкопористого асфальтобетона (фракции до 15 мм) $d = h = 71,4$ мм;

для крупнозернистого асфальтобетона (фракции до 35 мм) $d = h = 100$ мм.

Образцы готовят прессованием. Режим прессования:

температура смеси $150 \pm 5^\circ\text{C}$;

уплотняющая нагрузка 20 МПа;

время прессования — 3 мин для уплотняемого асфальтобетона (могут также образцы изготавливаться вибрированием).

Подбор составов осуществляется из наличия исходного материала.

7.5. Пример подбора состава асфальтобетона

В настоящем разделе приведены наиболее характерные примеры подбора составов асфальтобетонов уплотняемой и литой консистенции, в частности, для уплотняемого мелкозернистого асфальтобетона по кривым плотных смесей.

В качестве скелетных минеральных материалов примем щебень фракций 5–20 мм и высевки фракций 0–5 мм, а в качестве порошкообразного наполнителя – цементную пыль. Гранулометрические составы и свойства материалов приведены в табл. 7.2. и на рис. 7.3. Так как подбираем мелкозернистый асфальтобетон, частицы крупнее 15 мм отсеиваем.

Определим количество каждого из взятых материалов, необходимого для введения в смесь, гранулометрический состав которой входил бы в рекомендуемые пределы кривых плотных смесей. Из рис. 7.3 видно, что в составе минеральной части асфальтобетона возможны резкие перегибы в точках, соответствующих диаметрам частиц 0,074; 0,14; 0,315 мм – по цементной пыли, и 20,5; 5,0; 10 мм – по высевкам и щебню. Исходя из этого, предварительное нахождение содержания составляющих в смеси будем вести по этим точкам.

Таблица 7.2

Свойства исходных материалов, использованных для подбора составов уплотняемого асфальтобетона

Наименование материала	Процентное содержание частиц мельче, мм						
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63
Щебень фр. 5–15 мм	100	67	25,5	1,91	0,19	0,17	0,15
Высевка фр. 0–5 мм	-	-	100	83,2	47,9	33,9	17,9
Цементная пыль	-	-	100	99,3	99,1	99,0	98,7

Наименование материала	Процентное содержание частиц мельче, мм			Истинная плотность г/см ³	Удельная поверхность, м ² /кг	
	0,314	0,14	0,074		Частиц мельче 0,63 мм	Всего материала
Щебень фр. 5–15 мм	0,14	0,13	0,0	2,7279	-	0,392 для частиц 15 мм
Высевка фр. 0–5 мм	10	1,2	0,6	2,6921	89,8	16,79
Цементная пыль	97,1	86,5	37,1	2,7910	-	210,6

Для точки, соответствующей диаметру 0,14 мм, наибольшее влияние на положение кривой будет оказывать цементная пыль, в которой частиц мельче 0,14 мм содержится 86,5 %. В высевах их всего 1,2 %. Так как на участке кривой гранулометрического состава минеральной части асфальтобетона для частиц мельче 0,14 мм должен быть резкий спад (рис. 7.3, кривая гранулометрического состава цемента), количество порошка определяем по верхнему пределу, ограниченном кривыми плотных смесей.

Примем, что в минеральной части асфальтобетона частиц мельче 0,14 мм должно быть 24 %. В этом случае содержание цементной пыли в минеральной части асфальтобетона должно быть $100 \times 24 : 86,5 = 2,7$. 7 % ~ 28 %.

Найдем необходимое содержание в смеси щебня фракции 5–15 мм и высевок. Для упрощения подбора пренебрегаем содержанием в цементной пыли частиц крупнее 2,5 мм. тогда содержание в смеси щебня и высевок будет равно $100 \% - 28 \% = 72 \%$. Из графика рис. 7.3. видно, что содержание в смеси частиц крупнее 2,5 мм должно быть в среднем 46 %. В высевке частиц крупнее 2,5 мм содержится 52,1 %, В щебне 99,7 % Содержание щебня в смеси обозначим через X. Составляем две пропорции и равенства, обозначив через A_1 – содержание в смеси частиц крупнее 2,5 мм и через A_2 – содержание в ней высевок.

Таблица 7.3

Подбор состава асфальтовых бетонов

Наименование материала	Содержание в смеси, %	Процентное содержание частиц размером менее, мм			
		5	10	5	2,5
1	2	3	4	5	6
<i>Исходные минеральные материалы</i>					
Щебень фр. 5–15 мм	-	100	38,1	2,85	0,28
Высевка фр. 0–5 мм	-	-	100	84,2	47,9
Цементная пыль	-	-	100	99,3	99,1

Окончание табл. 7.3

1	2	3	4	5	6
<i>Предварительный состав</i>					
Щебень фр. 5–15 мм	18	18	6,86	0,51	0,05
Высевка фр. 0–5 мм	54	-	54,0	44,93	25,87
Цементная пыль	28	-	28,0	27,8	27,80
Сумма	100	100	88,86	73,24	53,72
<i>Окончательный состав</i>					
Щебень фр. 5–15 мм	20	20	7,62	0,57	0,06
Высевка фр. 0–5 мм	52	-	52,0	43,52	24,9
Цементная пыль	28	-	28,0	27,8	27,9
Сумма	100	100	87,62	71,62	52,76

Выражая A_2 , через A_1 ($A_2 = 46 - A_1$) и решая полученное равенство относительно A_1 находим, что необходимое содержание, в смеси частиц щебня крупнее 2,5 мм составляет 17,8%. Воспользовавшись первой пропорцией, находим необходимое содержание в смеси щебня.

$$x = \frac{100 \cdot 17,8}{99,7} = 17,85 = 18\%$$

Следовательно, содержание высевок в смеси будет 54% (72–18).

Таким образом, в качестве предварительного принимаем следующий состав минеральной части асфальтобетона. %:

щебень фракции 5–15 мм – 18

высевки – 54

цементная пыль – 28

Таблица 7.4

**Фракционный состав скелетных минеральных материалов,
использованных при подборе состава литого асфальтобетона**

Диаметр частиц, мм	Содержание частиц, %	
	Щебень фракции	Песок фракции
40	100	-
20	93,02	-
15	76,00	-
10	54,89	-
5	0,0	100
2,5	-	85,6
1,25	-	81,54
0,63	-	79,73
0,314	-	67,31
0,14	-	10,47
0,08	-	3,46

Проверим, как ложится полученный состав в пределы, ограниченные кривыми плотных смесей.

Из рис. 7.3. видно, что найденный состав приближается к верхнему пределу, ограниченному кривыми плотных смесей, поэтому желательно его несколько подкорректировать. При этом начальный участок кривой из-за малого содержания в цементной пыли частиц мельче 0,074 мм. корректировке не поддается. Участок кривой для частиц крупнее 0,63 мм можно несколько опустить за счет увеличения в смеси щебня, содержание которого примем равным 20%.

Гранулометрический состав минеральной части асфальтобетона, содержащего 20% щебня, 52% высевок и 28% цементной пыли, приведен в табл. 7.4. и на рис. 7.3. (кривая 7).

8. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Строительные материалы, служащие для тепловой изоляции конструкций зданий, оборудования и трубопроводов называют теплоизоляционными.

Материалы имеют низкую теплопроводность – не более 0,18 Вт/м.К и небольшую среднюю плотность – не выше 600 кг/м³. Применение теплоизоляционных материалов является одним из важнейших направлений прогресса в строительстве, в том числе гидротехнического.

Основной характеристикой теплоизоляционных материалов является теплопроводность, от величины которой они делятся на три группы:

класс А – малотеплопроводные с теплопроводностью меньше 0,058 Вт/м.К;

класс Б – среднетеплопроводные с теплопроводностью в пределах 0,058–0,116 Вт/м.К;

класс В – повышенной теплопроводности – не более 18 Вт/м.К.

Вследствие сложности определения теплопроводности, теплоизоляционные материалы обычно можно классифицировать по средней плотности, значение которой характеризует теплопроводность.

Все материалы в зависимости от средней плотности (кг/м³) делятся: на особо легкие (ОЛ) с маркой 15.

35. 50. 75. 100:

легкие (Л) – 125. 150. 175, 200, 225. 250. 300, 350 и тяжелые (Т) – 400. 450, 500, 600.

По виду исходного сырья материалы могут быть: неорганические (минеральная и стеклянная вата, ячеистый бетон, материалы на основе асбеста) и органические (древесноволокнистые и древесностружечные плиты, пластмассы и т. д.).

Изготавливаются комбинированные материалы, включающие неорганическое и органическое сырье (арболит, минеральное волокно).

По внешнему виду и форме теплоизоляционные материалы делят на сыпучие и штучные. Сыпучие материалы представляют собой рыхлые массы порошкообразного зернистого или волокнистого строения. Штучные материалы имеют форму и размеры и носят названия изделий. Их выпускают в виде жестких плит, листов, блоков.

По характеру применения различают материалы, используемые для изоляции конструкций, находящихся в обычных температурных условиях, и горячих поверхностей. По возгораемости материалы делятся на негорючие, трудногорючие и горючие.

8.1. Строение и свойства теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционные материалы могут быть ячеистого зернового, волокнистого строения. Необходимую пористость создают различными технологическими приемами.

Материалы ячеистого строения имеют однородные, равномерно распределенные поры правильной формы. Для получения ячеистого строения (газобетон, ячеистый бетон и т. д.) используют газовыделение и пенообразование.

Сыпучие материалы имеют зернистое строение. Пористость таких материалов зависит от зернового состава. Чем однороднее материал, тем больше пористость.

Волокнистое строение характерно для материалов из минерального или органического волокна (асбест, минеральная вата и т. д.). Пористое строение таких материалов получают созданием волокнистого каркаса с тонкими воздушными прослойками.

Пористость определяет основные свойства теплоизоляционных материалов: среднюю плотность, теплопроводность, прочность, газонепроницаемость и др. Важными являются равномерное распределение воздушных пор в материале, их характер, химический состав и условия применения теплоизоляционного материала.

Теплопроводность является главной характеристикой теплоизоляционных свойств материала.

В пористых материалах передача тепла происходит через стенки пор, а также через пузырьки воздуха, заключенные в них. Материал с большой пористостью обладает более низкой теплопроводностью. При равной пористости более высокими теплоизоляционными свойствами обладают материалы, имеющие мелкие замкнутые поры. Увлажнение и замерзание воды в порах материала приводит к резкому увеличению теплопроводности, так как теплопроводность воды в 25, а льда в 100 раз больше, чем воздуха. Важным условием является предохранение таких материалов от увлажнения.

Теплопроводность материалов с волокнистым и слоистым строением зависит от направления потока тепла. Для дерева теплопроводность вдоль волокон примерно в два раза выше, чем поперек.

Прочность, теплоизоляционных материалов, вследствие их пористого строения невелика. Предел прочности при сжатии колеблется от 0,2 до 2,5 МПа. Материалы, у которых прочность при сжатии выше 5 МПа, называют теплоизоляционно-конструктивными и используют для несущих ограждающих конструкций. Требуется, чтобы прочность теплоизоляционных материалов была достаточной для их сохранности при транспортировании, складировании, монтаже и работе в необходимых эксплуатационных условиях.

8.2. Органические теплоизоляционные материалы и изделия

Основой для изготовления таких материалов является древесина (опилки, стружка, горбыль) и другое растительное сырье, волокнистые отходы (камыш, торф). Большое количество изделий получают на основе полимеров и смол.

Древесина является пористым материалом (пористость 60–70%).

Древесная стружка и волокна располагаются в некоторых теплоизоляционных изделиях так, что тепловой поток в конструкции направлен не вдоль, а поперек волокон, что создает дополнительное сопротивление прохождения тепла.

Сырьем для производства деревоволокнистых плит выступает неделовая древесина, отходы лесопильной и деревообрабатывающей промышленности.

9. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНА В ГТС

Под противофильтрационным устройством из полиэтиленового материала понимается конструкция, состоящая из подстилающего слоя, плёночного элемента и защитного слоя.

Полиэтиленовые противофильтрационные устройства рекомендуют применять в грунтовых сооружениях III–IV классов, а также при обосновании и для сооружений I и II классов высотой до 60 м (рис. 9.1.)

При проектировании противофильтрационных устройств следует применять плёночный и листовый полиэтилен низкой плотности толщиной от 0,2 мм и выше, выпускаемый промышленностью и обладающий следующими физико-механическими свойствами:

– разрушающее напряжение при растяжении – не менее 120 кгс/см²;

– относительное удлинение при разрыве – не менее 200 %;

– стойкость не менее -0,920 г/см³;

– температура хрупкости не выше -60 °С.

Для противофильтрационных устройств следует применять стабилизированный полиэтилен.

Основные данные по физико-механическим характеристикам приведены в табл. 9.1.

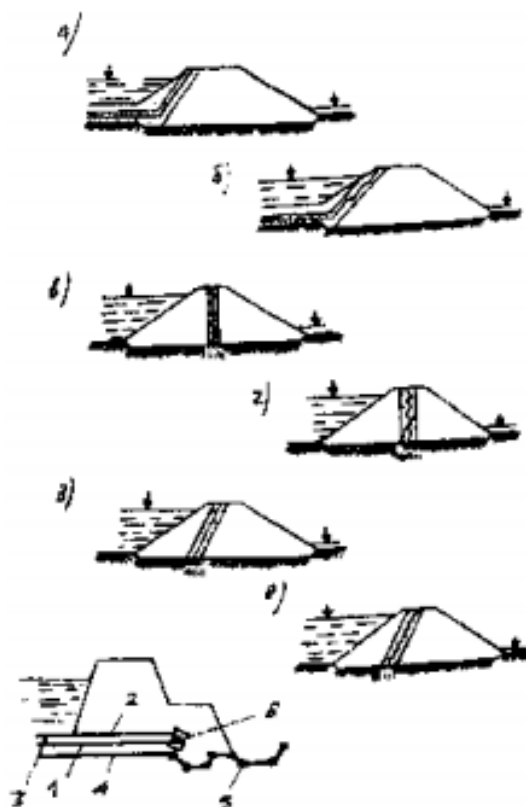


Рис. 9.1. ПДБ – полимеры дегтебитумные а, б, – экраны; в, г, д – наклонная и вертикальная диафрагмы 1 – плёночное покрытие; 2 – защитный слой; 3 – пригрузка; 4 подстилающий слой; 5 – крепление для пленки; 6 – дренаж

Таблица 9.1

№ п/п	Показатели	По данным экспериментальных исследований
1	Молекулярный вес	18000–35000
2	Индекс расплава, г/10 мин.	0,2–15,0
3	Плотность г/см ³	0,919–0,925
4	Степень кристалличности, %	55–70
5	Разрушающее напряжение при растяжении, кгс/см ²	120–150
6	Температура размягчения, °С	108–120
7	Теплопроводность, кал./сек.см.град.	0,00070
8	Удельная теплоёмкость при 25 °С, кал./град.	0,50–0,68
9	Коэффициент линейного расширения в интервале температур, °С:	
	От -50 до 0	0,00015
	От 0 до 10	0,00014
	От 10 до 30	0,00018
	От 30 до 40	0,00029
	От 40 до 50	0,00030
10	Водопоглощение за 30 суток при 20 °С, %	0,035–0,22
11	Температура хрупкости, °С	Ниже -60

9.1. Плёночные

Применение пленки не допускается:

а) если в жидких отходах содержатся вещества, растворяющие пленку;

б) если температура в зоне пленки выше 20°C;
 в) если при температуре 0°C невозможно обеспечить соответствующее количество;
 г) если в основном сооружении залегают грунты, склонные к неравномерным деформациям;

д) при возможности образования морозостойких резин в основе.

Величина допускаемого напряжения при растяжении (Е) определяется в зависимости от температуры плёночного противофильтрационного устройства по формуле:

$$E = 0,24A \exp\left(\frac{B}{t + 273}\right),$$

где А, В – постоянное, определяемое опытным путём; t – температура плёночного устройства.

9.2. Геотекстиль в гидротехническом строительстве

Новый материал, который получил широкое распространение и значительно сокращает трудоёмкость, а также повысил надёжность работы узлов: дренажей, противофильтрационных устройств. Характеристика материала приведена в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Техническая характеристика рулонных защитно-фильтрующих материалов отечественного производства

№ п/п	Материал	Марка	Технические условия	Масса 1 м ³	Диаметр волокна, мм
1	Стекловолоконный холст	ВВ-АМ	ТУ 21–23–131–80	100	16
		ВВ-М	ТУ 21–23–141–81	200	16
		ВВ-Г	ТУ 21–23–44–79	50+15	15
		ВВ-Т	ТУ 21–384–75	100+37	18
		ВВ-К	ТУ 21–23–97–77	100+30	18
2	Полотно нетканое иглопробивное защитно-фильтрующее	СИЗИ	ТУ 42–21–06–78	200+10	-
3	Полотно нетканое клёное	НКЛМ	ТУ 33–144–80	100	15
4	Фильтры нетканые дренажные для мелиоративных систем	-	ТУ 550.2.121–81	300...500+5	15
5	Полотно нетканое клёное технического назначения	-	ТУ 17 УССР 3650–83	76+6	-
6	Полотно клёное для защиты от замления	-	ТУ 17 РСФСР 52–10201–81	60+5	15
7	Нитрон нетканый иглопробивной	-	ТУ 33–14–83 Союзводполимер	200	-
8	Лавсан нетканый клёный	ВНИИНТИ	ТУ 17–14–195–83	75	-
9	Нетканый клёный материал из вторичного текстильного сырья	ВИВР	ТУ 63–178–ОП	-	-
10	Полотно нетканое клёное защитно-фильтрующее для дренажа	-	ТУ 33–39–81 УССР	70	-
11	Холст волокнисто-пористый из полиэтилена (полиэтилен-холст)	ПЭ-холст	ТУ 21 УССР –75	170–15	-

Геосинтетические материалы – это полимерные материалы с высокой молекулярной массой, макромолекулы которых состоят из большого числа повторяющихся молекулярных звеньев и включают атомы углерода с ковалентными связями. Такие материалы воспринимают значительные растягивающие напряжения, сохраняют прочность даже при больших деформациях, долговечны, технологичны и эффективны в строительстве.

Строительство ГТС с применением геотекстиля нашло широкое применение. Построены плотины с высотой даже больше 100 м, например. Ант Чоуарит (144 м. Марокко): Атбошинская (СНГ, 76 м). Хапс Стриж – дом (95, 88,56, ЮАР). Фрауэмау (86 м, Германия) и др.

Необходимо различать между собой геомембраны и геотекстили.

Геомембраны предназначены для противофильтрационных целей ($K_f = 10 \cdot 10^{-13}$ см/с), геотекстили проницаемы ($k = 10^{-3} \dots 100$ см/с). Термин «геосинтетика» введен в между народной практике для идентификации полимерных материалов.

Геомембраны представляют собой изгибаемые пленочные материалы. Их изготавливают из синтетических полимеров, наиболее часто в качестве базовых продуктов для изготовления геомембран используют, термопластики; кристаллические термопластики: эластомеры (изопрен) и др. В качестве добавок применяют: уголь, известь, порошок глинистого сланца, стабилизирующие добавки и пр. Армирующий материал может представлять собой тканый или нетканый текстиль, геосетки из полиамида или стекловолокна. Изготавливают геомембраны в размерах шириной от 1,5 до 10 м. толщина геомембран: — неармированных — 0,75–4 мм; — армированных — 3–10 мм.

В нашей стране геотекстиль был применен впервые в дорожном строительстве. Был разработан нетканый текстильный материал Дормит (ТУ 21–29–81–81). В настоящее время выпускается два вида Дормита: Ф-1 и Ф-2.

Дормит Ф-1 вырабатывают из отходов штапельных волокон механическим способом холстообразования укладкой слоями пряжи с чесальных машин и в результате получается продукция в виде волокнистого холста.

Дормит Ф-2 получают из смеси отходов синтетических волокон посредством аэродинамического формирования холста с последующим упрочнением его иглопробивным способом. Аналогичен ему по своим свойствам филонит (ТУ 64.170.ПО.83). Для дренажей в гидротехническом строительстве при гидромелиорации выпускают текстильный материал СИЗИ (ТУ 17–14–101.79). изготовленный из отходов капроновой пряжи.

Геотекстиль применяют в следующих типах плотин (рис. 9.2):

а) с экраном; б) с диафрагмой; в) многоярусным дренажом; г) диафрагмой и стенкой в грунте.

Типовые варианты применения, условные обозначения см. на рис. 9.3, геосинтетики приведены в качестве дренажей и фильтров на рис. 9.4.

В однородных земляных плотинах геосинтетические материалы применяют для устройства: — горизонтальных дрен (1); — вертикальных дрен (2); — наклонных дрен (3); — дрен по основанию (4).

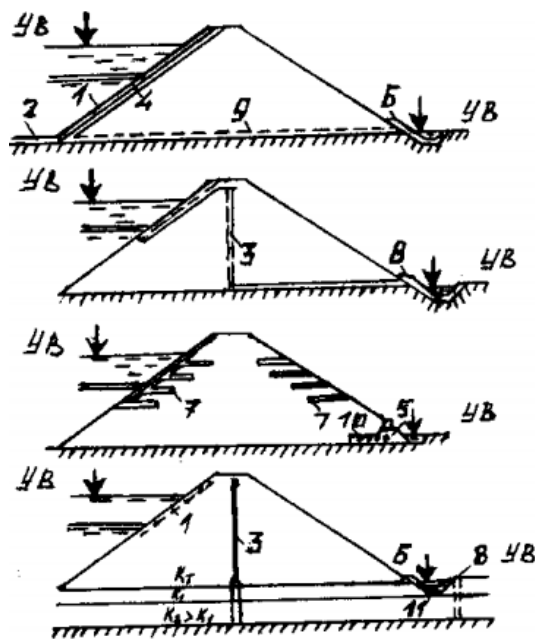


Рис. 9.2. Типы грунтовых плотин с геотекстилем 1 — экран; 2 — понур; 3 — диафрагма; 4 — защитный слой; 5 — дренажная призма; 6 — наклонный дренаж; 7 — горизонтальный дренаж; 8 — вертикальный дренаж; 9 — дренажный коллектор; 10 — трубофильтры; П — дренажная накова

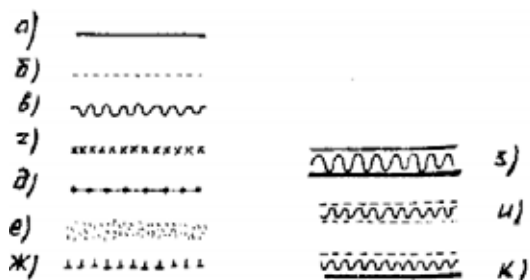


Рис. 9.3. Обозначение конструктивных элементов, применяемых при строительстве плотин и функции геосинтетики а — противдиффузионная преграда; б — фильтрующий слой с разделительной функцией; в — передача силового воздействия; г — промежуточный слон; д — макроармирование; е — микроармирование; ж — поверхностное армирование; з — конструктивный элемент; и — двойное покрытие; к — дренаж покрытие

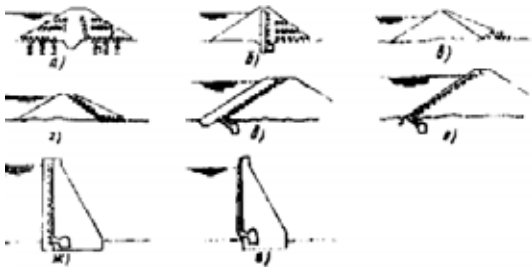


Рис. 9.4. Применение геосинтетики в качестве дренажа

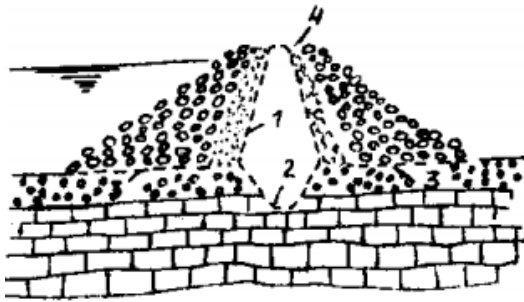


Рис. 9.5. Применение геосинтетики в качестве раздельного слоя

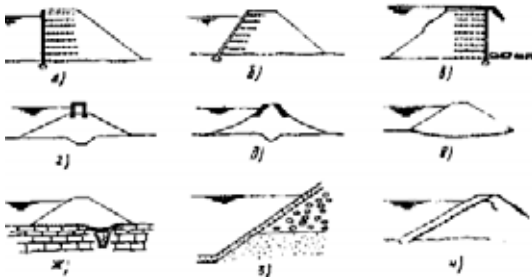


Рис. 9.6. Применение геосинтетики для армирования плотин

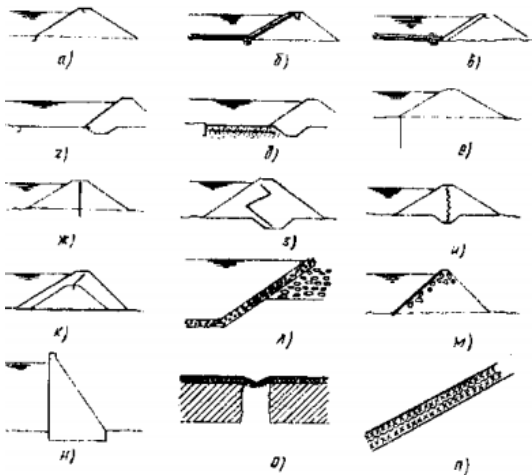


Рис. 9.7. Применение геосинтетики в качестве противофильтрационных элементов

Госинтегический материал, уложенный между разными грунтами, выполняет функции разграничивающего элемента, предотвращая взаимное проникновение грунтов (рис. 9.5).

Геосинтетики применяются для армирования грунтов при строительстве (рис. 9.6).

Наиболее часто геосинтетические материалы в виде геомембран используют для устройства прогнитофильтрационных элементов (рис. 9.7).

В борьбе с суффозией грунтов и при защите откосов применяют геосинтетические материалы в виде геоматов и геосеток (рис. 9.8), а также в виде подстилающего слоя для бетонных плит (рис. 9.8 г).



Рис. 9.8. Применение геосинтетики в качестве покрытия с целью борьбы с эрозией и для защиты откосов

10. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

10.1. Общие сведения

Лакокрасочными материалами называют вязко жидкие составы, наносимые на поверхность конструкции тонким слоем, которые за несколько часов отвердевают и образуют пленку, прочно сцепляющуюся с основанием.

К лакокрасочным материалам относятся: а) грунтовки и шпаклевки для подготовки поверхности к окраске; б) красочные составы, применяемые в вязкожидком и пастообразном видах, образующие покрытия цвета; в) связывающее вещество и пигменты, из которых изготавливают красочные составы; г) лаки, создающие пленку, отличающиеся блеском; д) растворители и разбавители лаков и красок; е) пластификаторы, отвердители полимерных красок.

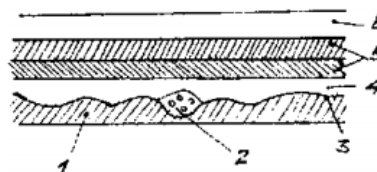


Рис. 10.1. 1 – основа (бетон); 2 – раковины, заполняемые цементным раствором; 3 – грунтовка; 4 – шпаклевка. 5 – слой красочного состава; 6 – слой лака

10.2. Основные компоненты красочного состава

Связующими веществами выступают полимеры – в полимерных красках, лаках, эмалях; каучуки – в каучуковых красках; производные целлюлозы – в нитролаках.

ПИГМЕНТЫ представляют собой тонкие цветные порошки, нерастворимые в связующем веществе и растворителе.

Подобно заполнителю в строительных растворах и бетонах пигмент уменьшает усадочные деформации пленки при ее твердении и при колебаниях влажности окружающей среды. Разбавляют наполнителем. Наполнители: мел, молотый известняк или гипс, порошки сернокислого бария или талька.

Неорганические пигменты состоят из оксидов и солей металлов различного цвета.

ОРГАНИЧЕСКИЕ ПИГМЕНТЫ – это молярная сажа, графит и синтетические красящие вещества, обладающие высокой красящей способностью. К ним относятся пигменты: желтый, оранжевый, светопрочный, голубой, алый. Бывают природными (мел, охра, мумия, железный сурик, киноварь) и искусственными. К искусственным пигментам, получаемым путем химической переработки сырья, относятся белила, малярная лазурь, краски ультрамарин и др.).

БЕЛЫЕ ПИГМЕНТЫ. К ним относятся белила, мел, известь, алюминиевая пудра.

Титановые белила представляют собой тонкий порошок диоксида титана TiO_2 . Их считают лучшими из современных белил. Применяют для масляных и эмалевых красок.

Свинцовые белила – белый порошок основного карбоната свинца $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$. Вследствие токсичности их применяют редко. Темнеют при действии сероводорода, сернистого газа и др. серных соединений.

ОЛИФА Олифами называют связывающее вещество в масляных красочных составах. Применяют натуральные и полунатуральные.

Натуральные олифы получают путем специальной обработки растительными маслами: льняными, конопляными и др. Высыхающие масла представляют смесь жиров и жирных кислот. Чтобы ускорить процесс отвердевания масло подвергают термической обработке при температуре 150°C с добавлением в него сикативов.

Термин высыхания олифы – условный, он характеризует переход олифы из жидкого в твердое состояние, обусловленное химическими процессами окисления кислородом воздуха, и полимеризацией.

ПОЛУ НАТУРАЛЬНЫЕ ОЛИФЫ получают путем растворения сильно уплотненного масла в летучем органическом растворителе.

Для производства полунатуральных олиф можно применять невысыхающие и полу высыхающие пищевые масла (хлопковое, подсолнечное, касторовое, соевое). непригодные для натуральных олиф. В результате специальной обработки масла сильно уплотняются. Густая масса доводится путем добавки растворителя, который испаряется.

ПОЛИМЕРНЫЕ КРАСКИ представляют собой суспензию пигмента в растворе полимера или перхлорвиниловой смолы, эпоксидно-полиамидная композиция, кремний органические эмали.

КАУЧУКОВЫЕ КРАСКИ получают путем диспергирования хлоркаучука в летучем растворителе. Каучуковые краски химически стойки и обладают высокой водостойкостью, их применяют для защиты от коррозии.

11. МЕТАЛЛЫ И МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЯ

11.1. Структура и свойства металлов

Металлы и металлические изделия имеют свои достоинства и недостатки. Рассмотрим основные достоинства металлоконструкций:

высокая несущая способность. Воспринимают значительные усилия при относительно небольших сечениях вследствие большой прочности металла;

высокая надежность. Благодаря однородности структуры металла и его упругим свойствам металлоконструкции можно рассчитать наиболее точно, что позволяет обеспечить полную надежность работы проектируемого сооружения;

лёгкость и транспортабельность в сравнение с другими конструкциями (железобетон, камень, дерево).

Показатель отношения средней плотности к расчетному сопротивлению $c = \rho/R$ имеет наименьшее значение для алюминиевых сплавов $c = 1,1 \cdot 10^{-1}/м$, для стали $c = 3,7 \cdot 10^{-1}/м$, для дерева $c = 4,5 \cdot 10^{-1}/м$, для бетона $c = 24 \cdot 10^{-1}/м$:

сплошность материала и соединений позволяет осуществлять водо газонепроницаемые конструкции;

металлоконструкции удобны в эксплуатации, могут быть легко усилены при увеличении нагрузок, наиболее полно используются при реконструкциях, легко ремонтируются.

Наряду с достоинствами металлоконструкций существуют и недостатки:

коррозия. Стальные конструкции подвержены воздействию коррозии, что требует специальных мероприятий по их защите (очистка, покраска). Наиболее рациональная конструктивная форма против коррозии – это отсутствие пазух, впадин и щелей, где могла бы развиваться коррозия:

малая огнестойкость. При температурах свыше $400^{\circ}C$ для сталей и свыше $200^{\circ}C$ для алюминиевых сплавов начинается ползучесть материала. Поэтому использование металлоизделий при указанных температурах без спецзащиты недопустимо.

Сталью называется сплав железа с углеродом (примерно до 1,7% углерода) и незначительным количеством других компонентов и примесей. В зависимости от содержания легирующих компонентов, которые специально вводятся с целью улучшения их свойств, стали делятся на три группы:

углеродистые – легирующие элементы не вводятся;

низколегированные – содержание легирующих элементов не выше 5%;

легировочные – содержание легирующих элементов свыше 5%.

Углеродистая сталь в зависимости от содержания углерода подразделяется на:

а) малоуглеродистую – содержание углерода до 0,23%. применяется в строительных металлоконструкциях;

б) среднеуглеродистую – содержание углерода 0,25–0,6%. применяется в машиностроении.

в) высокоуглеродистую – содержание углерода более 0,6%. Эта сталь называется инструментальной.

По способу выплавки строительные стали разделяются на мартеновские, конверторные и бессемеровские.

Стали с одинаковым химическим составом и механическими свойствами различаются по маркам. В зависимости от степени раскисления различают спокойную, полу спокойную и кипящую.

Спокойная сталь при разливке ее в изложницы остывает спокойно, без бурного выделения содержащихся в ней газов, приводящих впоследствии к внутренним порокам и рассло-

нию металла при прокатке, имеет лучшую структуру и однородное строение. Эти показатели в полуспокойной и кипящих сталях ниже, поэтому для ответственных конструкций с большими усилиями, при знакопеременных и вибрационных воздействиях применяют спокойную сталь, а в менее ответственных – полуспокойную и кипящую.

В зависимости от назначения и гарантируемых характеристик углеродистая сталь подразделяется на:

группа А – гарантируются механические свойства:

группа Б – гарантируется химический состав:

группа В – гарантируются механические свойства и отдельные требования по химсоставу.

Сталь группы А в строительных конструкциях, как правило, не применяется.

Сталь группы Б применяется для второстепенных нерасчетных элементов конструкции.

Сталь группы В – применяется преимущественно в строительных конструкциях, так как для свариваемости и высокого качества стали требуется соблюдение способа выплавки и норм по химсоставу.

Механические свойства стали характеризуют следующие основные показатели:

1. *Предел текучести* – характеризующий собой напряжение, до достижения которого можно считать материал работающим упруго и можно пользоваться методами расчета по у пр у гой стадии материала. Предел текучести является началом границы пластической стадии работы металла, то есть началом возрастания деформаций при неизменной нагрузке.

Временное сопротивление (предел прочности) – характеризующее собой условное напряжения разрыва растянутого образца (отношение разрушающей нагрузки к первоначальной площади сечения). Временное сопротивление характеризует прочность стали.

Относительное удлинение – отношение длины образца после разрыва к ее исходной величине. Характеризует пластические свойства стали.

Ударная вязкость – работа, затраченная на разрушение специального образца ударным изгибом. Характеризует склонность стали к переходу в хрупкое состояние. а так как эта склонность зависит от структуры стали, ее чистоты и однородности, то по величине ударной вязкости оценивают эти качества.

Загиб в холодном состоянии на 180°. Это испытание характеризует пластические свойства стали и склонность ее к трещинообразованию.

11.2. Термическая и механическая обработка металлов

По способу выплавки строительные стали разделяются на мартеновские, конверторные и бессемеровские.

Мартеновские стали давно применяются в строительных металлоконструкциях и хорошо себя зарекомендовали. Конверторные стали до недавнего времени в строительстве не применялись из-за наличия большого количества вредных примесей и растворенных газов. Однако современные методы выплавки конверторной стали с продувкой кислородом позволяют получить удовлетворительную по качеству сталь, пригодную к применению в строительстве. Бессемеровские стали имеют значительное количество вредных примесей (фосфор, сера, азот, кислород) и для строительных металлоконструкций не применяются.

Специальной термической обработкой можно улучшить механические свойства углеродистых и низколегированных сталей, повысив их прочность без большого снижения пластичности.

11.3. Арматурные стали

Арматура в железобетонных конструкциях предназначена преимущественно для восприятия растягивающих усилий в изгибаемых и растянутых элементах и для усиления сечений

сжатых элементов. Необходимое ее количество определяют расчетом на восприятие проектных нагрузок. Эта арматура называется рабочей.

Для восприятия усилий от усадочных и температурных деформаций бетона, монтажных нагрузок, для обеспечения проектного положения арматуры в элементах конструкций и по некоторым другим соображениям ставят монтажную арматуру

Стержневая арматура, проходящая после прокатки термическую обработку, называется термически упрочненной, а подвергающаяся вытяжке в холодном состоянии – упрочненной вытяжкой.

По условиям применения арматуру, подвергаемую предварительному натяжению, называют напрягаемой.

Стержневая арматурная сталь подразделяется на семь классов: А-1, А-2, А-3 и т.д., в зависимости от основных ее механических характеристик. В обозначении класса стали упрочнение ее отмечается дополнительным индексом т (термическое упрочнение).

11.4. Строительные металлоизделия

В настоящее время металлические конструкции наиболее широко применяются для следующих видов сооружений.

Промышленные изделия. На несущие элементы каркаса промзданий (колонны, фермы, подкрановые балки) расходуется до 30 % веса строительных металлоконструкций.

Листовые конструкции представляют собой различные емкости, оболочки, кожухи, трубопроводы. Применяют в следующих сооружениях: различные резервуары для хранения жидкостей, газгольдеры для хранения и распределения газов, бункера для хранения и перегрузки сыпучих материалов, конструкции доменных цехов, конструкции предприятий химической и нефтяной промышленности, сварные трубопроводы большого диаметра.

Специальные конструкции гражданского и промышленного назначения:

пролетные строения железно- и автодорожных мостов, путепроводов и эстакад;

большепролетные покрытия зданий общественного (выставочные, спортивные сооружения) и специального назначения (ангары, авиасборочные цехи):

сооружения башенного и мачтового типов: башни, мачты для радиосвязи и телевидения, опоры линий электропередач высокого напряжения, башни для маяков и освещения, буровые и нефтяные вышки:

несущие каркасы высотных зданий;

– подвижные конструкции: несущие конструкции больших подъемно-транспортных машин и экскаваторов, затворы гидротехнических сооружений, ворота шлюзов. Конструкции из алюминиевых сплавов вследствие дефицитности алюминия применяются мало. Однако легкость, прочность и коррозионная стойкость сплавов позволяют эффективно использовать эти конструкции в различных сооружениях. Сюда относятся кровельные и ограждающие панели для различных зданий, витражи остеклений, листовые конструкции и трубопроводы для агрессивных жидкостей, большепролетные перекрытия, подвижные конструкции, в которых большое значение играет собственный вес, сборно-разборные конструкции многократного использования, некоторые конструкции, возводимые в труднодоступных районах.

11.5. Сварка и резка металлов

11.5.1. Виды сварки и их характеристика

Преимущественное распространение в строительных металлоконструкциях имеет электродуговая сварка плавящимся электродом.

Таблица 11.1

Классификация способов электродуговой сварки

Электродуговая сварка					
Покрытым электродом			Голой проволокой		
			Под флюсом	В среде защитного газа	Электрошлаковая
Ручная	Автоматическая	Полуавтоматическая	Автоматическая	Полуавтоматическая	Автоматическая

Ручная электродуговая сварка – наиболее медленный и трудоемкий вид сварки.

При ее применении соединение получается более низкого качества, чем при механизированных способах. Однако она имеет очень большое распространение благодаря своей универсальности: может производиться в любом положении и в труднодоступных местах.

Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Особенность сварки под флюсом состоит в том, что сварочная дуга горит между электродной проволокой и свариваемым изделием под слоем специального сыпучего флюса. Сварочная ванна получается более глубокой и удлиненной формы. Достоинством сварки под флюсом является высокая производительность и хорошее качество швов, недостатком – производство швов в нижнем положении, что ограничивает ее применение, особенно при монтаже металлических конструкций.

Сварка в среде защитного газа осуществляется полуавтоматическим способом плавящейся электродной проволокой. Сварка в углекислом газе имеет ряд преимуществ по сравнению со сваркой под флюсом: не требуется приспособлений для удержания флюса, и поэтому можно варить в любом пространственном положении, обеспечивается глубокий провар и высокая производительность. Недостатком является возможность оттеснения газа ветром или сквозняком, что снижает защитное действие газа и ухудшает качество шва.

Электрошлаковая сварка. В этом случае свариваемые листы располагают вертикально с зазором 20-40 мм: низ зазора ограничен стальной прокладкой, бока – медными ползунами, охлаждаемые проточной водой. Электрошлаковая сварка дает очень качественный шов. Применяют при сварке толстых (свыше 20 мм) элементов.

Сварные соединения могут быть:

встык – свариваемые детали приставляются одна к другой встык и место их соединения проплавляется сварным швом;

внахлестку – одна деталь накладывается на другую и проваривается по отдельным граням или всему контуру соединения;

комбинированные – детали свариваются встык и для усиления привариваются накладки внахлестку.

11.6. Коррозия металлов

В процессе работы стальные конструкции, особенно при недостаточной их защите, подвергаются воздействию коррозии. Разрушение металла от коррозии является не менее важным, чем разрушение от механических воздействий.

Коррозия может быть химической, вызванной непосредственным воздействием на металл агрессивных жидкостей или газов, и электрохимической, вызванной воздействием влаги и кислорода воздуха на поверхностный слой металла.

Для строительных металлических конструкций характерна атмосферная коррозия, которая является электрохимической, однако в случае наличия в среде агрессивных примесей происходит электрохимическая и химическая коррозии.

Продукт коррозии – ржавчина, имеет значительно больший объем, чем металл, из которого она образовалась. Кроме того, увлажнение вызывает разбухание ржавчины и еще большее

увеличение ее объема. Ржавчина, заполняя трещины на поверхности металла, являющиеся следствием прокатки, сварки, дефектов структуры, усталости металла и других причин, и затем, увеличиваясь в объеме, расширяет и углубляет их, ослабляя сечение конструкции и образуя концентраторы напряжений. Развиваясь между склепанными элементами, ржавчина вызывает местные вздутия и даже отрыв головок-заклепок.

В узких щелях конструкций при наличии в них влаги и пыли возможно образование коррозии в виде раковины, заполненной ржавчиной. Такие раковины могут иметь довольно большие размеры и представлять опасность для несущей способности элемента.

Основными мероприятиями по борьбе с коррозией металлоконструкций являются следующие:

проектирование металлических изделий без узких щелей, пазов, с формой сечений элементов, хорошо обтекаемой воздушными струями, не удерживающей пыли, открытой для окраски;

качественная грунтовка изготовленных конструкций и последующая их окраска правильно выбранными лакокрасочными покрытиями;

периодическая окраска металлоконструкций через каждые 3–6 лет эксплуатации.

11.7. Влияние отрицательных температур на свойства стали

Кроме силовых воздействий на работу стали оказывает существенное влияние ряд других факторов: повторность и знакопеременность нагрузки, температура и т.д. Некоторые из них приводят к уменьшению пластичности стали и способствуют склонности перехода ее в хрупкое состояние, очень опасное для конструкции, другие снижают прочность, приводят к преждевременному разрушению. Все это важно и необходимо учитывать при проектировании металлоконструкций.

При отрицательных температурах увеличивается хрупкость стали, что особенно важно учитывать при строительстве в районах Крайнего Севера.

Строительные стали становятся хрупкими при температурах: малоуглеродистые кипящие при $-30 \dots -35^\circ\text{C}$, малоуглеродистые спокойные – $45 \dots 50^\circ\text{C}$ и низколегированные – $55 \dots 60^\circ\text{C}$.

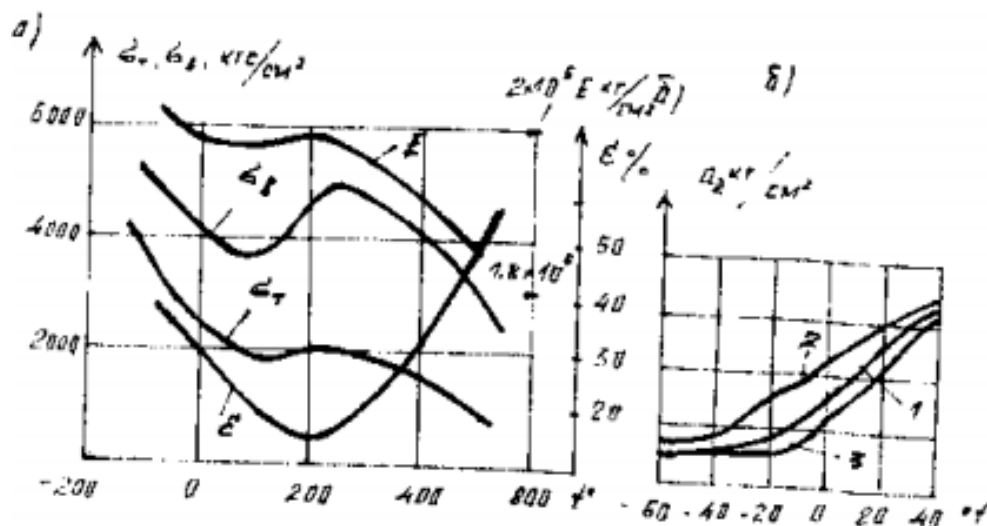


Рис. 11.1. Влияние температуры на механические характеристики малоуглеродистой стали: 1 – сталь; 2 – низколегированная сталь; 3 – наплавленный металл качественными электродами

На рис. 11.1. показано изменение ударной вязкости стали, характеризующее склонность ее к переходу в хрупкое состояние в зависимости от температуры.

12. КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

12.1. Общие сведения о композиционных материалах

Композиционный материал – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

Механическое поведение композита определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик.

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композита, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, наличие границ раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала, и в композитах, в отличие от металлов, повышение статической прочности приводит не к снижению, а, как правило, к повышению характеристик вязкости разрушения.

Преимущества композиционных материалов:

- высокая удельная прочность
- высокая жёсткость (модуль упругости 130...140 ГПа)
- высокая износостойкость
- высокая усталостная прочность
- из КМ возможно изготовить размеростабильные конструкции

Причём, разные классы композитов могут обладать одним или несколькими преимуществами. Некоторых преимуществ невозможно добиться одновременно.

Недостатки композиционных материалов.

Большинство классов композитов (но не все) обладают недостатками:

- высокая стоимость
- анизотропия свойств
- повышенная наукоёмкость производства, необходимость специального дорогостоящего оборудования и сырья, а следовательно развитого промышленного производства и научной базы страны

12.2. Состав и строение композита

Композиты – многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или др. основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. Использование в одном материале нескольких матриц (полиматричные композиционные материалы) или наполнителей различной природы (гибридные композиционные материалы) значительно расширяет возможности регулирования свойств композиционных материалов. Армирующие наполнители воспринимают основную долю нагрузки композиционных материалов.

Таблица 12.1

СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ				
Матрица	Армирующий наполнитель	Плотность, г/см ³	$\sigma_{изг}$, ГПа	Модуль упругости, ГПа
Эпоксидная	Полимерные			
	Стекловолокно	1,9 2,2	1,2 2,5	50 68
	Органическое (арамидное) волокно	1,3–1,4	1,7 2,5	75 90
	Углеродное волокно	1,4 1,5	0,8 1,5	120 220
	Борное волокно	2,0 2,1	1,0 1,7	220
Алюминиевая	Металлические			
	Борное волокно	2,6	1,0 1,5	220 250
Магниева	Углеродное волокно	2,3	0,8–1,0	200–220
	Борное волокно	2,0	0,7 1,0	200 220
Никелевая	Углеродное волокно	1,8	0,6 0,8	180 220
	Вольфрамовая проволока	12,5	0,8	265
Углеродная	Молибденовая проволока	9,3	0,7	235
	Углеродные			
Керамическая	Углеродное волокно	1,5 1,8	0,35 1,0*	120 220
	Керамические			
	Волокно карбида кремния	3,2	0,48*	

* Прочность при изгибе.

По структуре наполнителя композиционные материалы подразделяют на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями), дисперсноармированные, или дисперсно-упрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц). Матрица в композиционных материалах обеспечивает монолитность материала, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, влаго-, огне- и хим. стойкость.

По природе матричного материала различают полимерные, металлические, углеродные, керамические и др. композиты.

Наибольшее применение в строительстве и технике получили композиционные материалы, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами. К ним относят: полимерные композиционные материалы на основе термореактивных (эпоксидных, полиэфирных, феноло-формальд., полиамидных и др.) и термопластичных связующих, армированных стеклянными (стеклопластики), углеродными (углепластики), орг. (органопластики), борными (боропластики) и др. волокнами; металлич. композиционные материалы на основе сплавов Al, Mg, Cu, Ti, Ni, Cr, армированных борными, углеродными или карбид-кремниевыми волокнами, а также стальной, молибденовой или вольфрамовой проволокой;

Композиционные материалы на основе углерода, армированного углеродными волокнами (углерод-углеродные материалы); композиционные материалы на основе керамики, армированной углеродными, карбидокремниевыми и др. жаростойкими волокнами и SiC. При использовании углеродных, стеклянных, арамидных и борных волокон, содержащихся в материале в кол-ве 50–70%, созданы композиции (см. табл. 12.1) с уд. прочностью и модулем упругости в 2–5 раз большими, чем у обычных конструкционных материалов и сплавов. Кроме того, волокнистые композиционные материалы превосходят металлы и сплавы по усталостной прочности, термостойкости, виброустойчивости, шумопоглощению, ударной вязкости и др. свойствам. Так, армирование сплавов Al волокнами бора значительно улучшает их механические характеристики и позволяет повысить т-ру эксплуатации сплава

с 250–300 до 450–500 °С. Армирование проволокой (из W и Mo) и волокнами тугоплавких соединений используют при создании жаропрочных композиционных материалов на основе Ni, Cr, Co, Ti и их сплавов. Так, жаропрочные сплавы Ni, армированные волокнами, могут работать при 1300–1350 °С. При изготовлении металлических волокнистых композиционных материалов нанесение металлической матрицы на наполнитель осуществляют в основном из расплава материала матрицы, электрохимическим осаждением или напылением. Формование изделий проводят гл. обр. методом пропитки каркаса из армирующих волокон расплавом металла под давлением до 10 МПа или соединением фольги (матричного материала) с армирующими волокнами с применением прокатки, прессования, экструзии при нагрев. до т-ры плавления материала матрицы.

Один из общих технологических методов изготовления полимерных и металлич. волокнистых и слоистых композиционных материалов - выращивание кристаллов наполнителя в матрице непосредственно в процессе изготовления деталей. Такой метод применяют, напр., при создании эвтектич. жаропрочных сплавов на основе Ni и Co. Легирование расплавов карбидными и интерметаллич. соедин., образующими при охлаждении в контролируемых условиях волокнистые или пластинчатые кристаллы, приводит к упрочнению сплавов и позволяет повысить т-ру их эксплуатации на 60–80 °С. композиционные материалы на основе углерода сочетают низкую плотность с высокой теплопроводностью, хим. стойкостью, постоянством размеров при резких перепадах т-р, а также с возрастанием прочности и модуля упругости при нагреве до 2000 °С в инертной среде. О методах получения углерод-углеродных композиционных материалов см. Углепластики. Высокопрочные композиционные материалы на основе керамики получают при армировании волокнистыми наполнителями, а также металлич. и керамич. дисперсными частицами. Армирование непрерывными волокнами SiC позволяет получать композиционные материалы, характеризующиеся повыш. вязкостью, прочностью на изгиб и высокой стойкостью к окислению при высоких т-рах. Однако армирование керамики волокнами не всегда приводит к значит. повышению ее прочностных св-в из-за отсутствия эластичного состояния материала при высоком значении его модуля упругости. Армирование дисперсными металлич. частицами позволяет создать керамико-металлич. материалы (керметы), обладающие повыш. прочностью, теплопроводностью, стойкостью к тепловым ударам. При изготовлении керамич. композиционные материалы обычно применяют горячее прессование, прессование с послед. спеканием, шликерное литье (см. также Керамика). Армирование материалов дисперсными металлич. частицами приводит к резкому повышению прочности вследствие создания барьеров на пути движения дислокаций. Такое армирование гл. обр. применяют при создании жаропрочных хромоникелевых сплавов. Материалы получают введением тонкодисперсных частиц в расплавленный металл с послед. обычной переработкой слитков в изделия. Введение, напр., ThO₂ или ZrO₂ в сплав позволяет получать дисперсноупрочненные жаропрочные сплавы, длительно работающие под нагрузкой при 1100–1200 °С (предел работоспособности обычных жаропрочных сплавов в тех же условиях – 1000–1050 °С). Перспективное направление создания высокопрочных композиционных материалов - армирование материалов нитевидными кристаллами («усами»), которые вследствие малого диаметра практически лишены дефектов, имеющих в более крупных кристаллах, и обладают высокой прочностью. наиб. практич. интерес представляют кристаллы Al₂O₃, BeO, SiC, B₄C, Si₃N₄, AlN и графита диаметром 1–30 мкм и длиной 0,3–15 мм. Используют такие наполнители в виде ориентированной пряжи или изотропных слоистых материалов наподобие бумаги, картона, войлока. композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы и нитевидных кристаллов ThO₂ (30 % по массе) имеют проч. 0,6 ГПа, модуль упругости 70 ГПа. Введение в композицию нитевидных кристаллов может придавать ей необычные сочетания электр. и магн. св-в. Выбор и назначение композиционных материалов во многом определяются условиями нагружения и т-рой эксплуатации детали или конструкции,

технол. возможностями.наиб. доступны и освоены полимерные композиционные материалы Большая номенклатура матриц в виде терморезактивных и термопластич.полимеров обеспечивает широкий выбор композиционные материалы для работы в диапазоне от отрицат. т-р до 100–200°C – для органоластиков до 300–400°C – для стекло-, угле- и бороластиков. Полимерные композиционные материалы с полиэфирной и эпоксидной матрицей работают до 120–200°, с феноло-формальдегидной– до 200–300°C, полиимидной и кремнийорг. – до 250–400°C. Металлич.композиционные материалы на основе Al, Mg и их сплавов, армированные волокнами из B, C, SiC, применяют до 400–500°C; композиционные материалы на основе сплавов Ni и Co работают при т-ре до 1100–1200°C, на основе тугоплавких металлов и соедин. – до 1500–1700°C, на основе углерода и керамики – до 1700–2000°C. Использование композитов в качестве конструкц., теплозащитных, антифрикц., радио – и электротехн. и др. материалов позволяет снизить массу конструкции, повысить ресурсы и мощности машин и агрегатов, создать принципиально новые узлы, детали и конструкции. Все виды композиционные материалы применяют в хим., текстильной, горнорудной, металлургич. пром-сти, машиностроении, на транспорте, для изготовления спортивного снаряжения и др.

12.3. Оценка матрицы и упрочнителя в формировании свойств композита

12.3.1. Композиционные материалы с металлической матрицей

Композиционные материалы состоят из металлической матрицы (чаще Al, Mg, Ni и их сплавы) упрочненной высокопрочными волокнами(волокнистые материалы) или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле(дисперсно-упрочненные материалы).Металлическая матрица связывает волокна (дисперсные частицы) в единое целое. Волокно (дисперсные частицы) плюс связка (матрица), составляющие ту или иную композицию, получили название композиционные материалы.

12.3.2. Композиционные материалы с неметаллической матрицей

Композиционные материалы с неметаллической матрицей нашли широкое применение. В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Из полимерных матриц наибольшее распространение получили эпоксидная, фенолоформальдегидная и полиамидная. Угольные матрицы коксованные или пироуглеродные получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу. Матрица связывает композицию, придавая ей форму. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и других), а также металлические(проволоки), обладающие высокой прочностью и жесткостью. Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей. Содержание упрочнителя в ориентированных материалах составляет 60–80 об.%, в неориентированных(с дискретными волокнами и нитевидными кристаллами) 20–30 об.%. Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного материала. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению. По виду упрочнителя композиционные материалы классифицируют на стекловолокнистые, карбоволокнистые с углеродными волокнами, бороволоконные и органоволоконные. В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим, укладываются параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоские слои собираются в пластины. Свойства получаются анизотропными. Для работы материала

в изделии важно учитывать направление действующих нагрузок. Можно создать материалы как с изотропными, так и с анизотропными свойствами. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композиционных материалов. От порядка укладки слоев по толщине пакета зависят изгибные и крутильные жесткости материала. Применяется укладка упрочнителей из трех, четырех и более нитей. Наибольшее применение имеет структура из трех взаимно перпендикулярных нитей. Упрочнители могут располагаться в осевом, радиальном и окружном направлениях. Трехмерные материалы могут быть любой толщины в виде блоков, цилиндров. Объемные ткани увеличивают прочность на отрыв и сопротивление сдвигу по сравнению со слоистыми. Система из четырех нитей строится путем разложения упрочнителя по диагоналям куба. Структура из четырех нитей равновесна, имеет повышенную жесткость при сдвиге в главных плоскостях. Однако создание четырехнаправленных материалов сложнее, чем трехнаправленных.

12.4. Строительные материалы – композиты

12.4.1. Полимеры в строительстве

Говоря о применении новых материалов на основе пластиков в стройиндустрии, стоит заметить следующее. Если в гражданском строительстве в основном применяются «традиционные» материалы, то в таких секторах, как, строительства мостов, железных дорог, мостов и др., у полимерных композитов есть неплохие перспективы.

Строительство – это размытый термин, который включает в себя самые разные механические нагрузки, начиная с легких нагрузок, которым подвергаются щиты, корпуса, гнезда для защиты оборудования или звуконепроницаемых стен, и заканчивая сверхвысоким давлением, которое выдерживают опоры для мостов.

Для поиска решений, применимых в этих несхожих ситуациях, в гражданском строительстве применяются очищенные пластмассы или композиты:

- Обычно применяемые в легких строительных конструкциях.
- Периодически используемые в специализированных (нишевых) конструкциях – Предназначенные исключительно для крупных строительных конструкций, например, мостов.

На рис. 12.1 изображено несколько примеров.

В гражданском строительстве используются традиционные материалы, например бетон и сталь, для которых характерна низкая стоимость компонентов, но высокая стоимость обработки и установки, а также низкие возможности обработки. Результатом внедрения пластмасс может стать следующее:

- Сокращение итоговых расходов.
- Повышение производительности.
- Снижение веса.
- Увеличение возможностей при проектировании в сравнении с деревом и металлами.
- Устойчивость к коррозии.
- Простота обработки и установки.
- Определенные полимеры могут пропускать свет и даже быть прозрачными.
- Простота технического обслуживания.
- Изоляционные свойства.

С другой стороны, следует помнить о старении и механическом сопротивлении. Тем не менее, не-



Рис. 12.1. Строительные конструкции в гражданском строительстве

которые проекты, построенные в середине 1950х годов с использованием полиэстера, укрепленного стекловолокном, демонстрируют значительную долговечность.

Отрасль гражданского строительства относится к консервативным, и перед расширением использования пластмасс и композитов стоят такие барьеры, как:

- Слабая изученность и малый опыт работы с этими материалами в отрасли гражданского строительства.
- Сложность перенесения опыта, накопленного в других отраслях промышленности.
- Сложность выбора и оценки размеров этих материалов.
- Сложность взаимопонимания между представителями различных профессий, обладающими очень разными менталитетами.
- Мнение о пластмассах, сложившееся в обществе.
- Жесткие окружающие условия на месте строительства.
- Сложные условия применения, которые не совсем совпадают с практикой и квалификацией строителей.

Прогрессивный ответ пластмасс возрастающим требованиям строительства: от очищенных термопластов к ориентированным композитам с углеродными волокнами. Композиты представляют особый интерес для строительной отрасли, так как им присущи высокие коэффициенты [производительность/вес/конечная стоимость].

Более того, возможность задания направления в композитном укреплении расширяет возможности при проектировании в сравнении со сталью.

В таблице 12.2 сравнивают несколько случаев, но также существуют и другие промежуточные решения.

Таблица 12.2

Примеры свойств от очищенных термопластов к однонаправленным композитам

Очищенные пластмассы и пластмассы, укрепленные коротким стекловолокном		
Характеристика	Полиуретан, полученный усиленным реакционным инжекционным формованием	Полиметилметакрилат для звуконепроницаемых стен
Стекловолокно, %	15	0
Плотность, г/см ³	1,14	1,19
Прочность на разрыв, МПа	20–27	70–80
Растяжение при разрыве, %	75–200	5
Модуль изгиба, ГПа	0,7–1,2	3,3
Воздействие надреза по Изоду, Дж/м	160–430	
Воздействие надреза по Изоду, кДж/м ²	-	1,6
Термореактивная пластмасса, усиленная стекловолокном, для BMC (стеклонаполненный премикс для прессования) и SMC (листовой формовочный материал)		
Характеристика	BMC	SMC
Вес стекловолокна	10–20	25–30
Плотность, г/см ³	1,7, – 2	1,7, – 1,9
Прочность на разрыв, МПа	30–40	48–110
Растяжение при разрыве, %	-	1,6, – 2
Модуль изгиба, ГПа	5–11	6–16
Воздействие надреза по Изоду, Дж/м	260–400	
Эпоксидная смола, усиленная однонаправленным углеродным волокном		
Вес углеродного волокна, %	65	
Плотность, г/см ³	1,5, – 1,7	
Прочность на разрыв, МПа	1,500–3,000	
Растяжение при разрыве, %	0,5–1,7	
Модуль изгиба, ГПа	100–400	

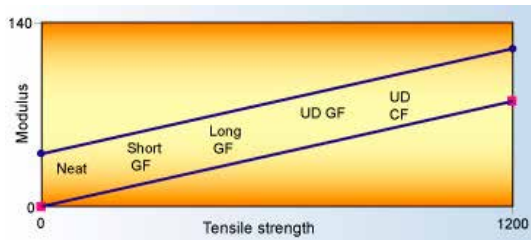


Рис. 12.2. Механическая эффективность пластмасс

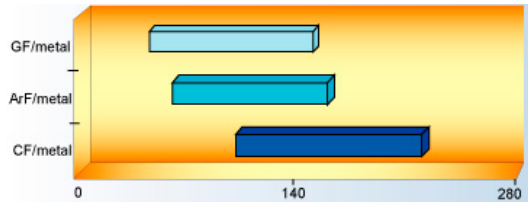


Рис. 12.3. Сравнительная стоимость композитов и металла

На рис. 12.2. приведена схема роста механической эффективности в соответствии с армированием полимера.

Затраты на материал для композитов всегда превосходят аналогичные затраты на металл, а самое дорогое это углеродно-волоконное армирование (см. рис. 12.3). Эти затраты на пластмассы и композиты компенсируются другими преимуществами.

В обмен на высокую стоимость материала композиты предлагают уникальный набор интересных свойств:

- Снижение веса – Сокращение расходов на сборку – Установка – Сокращение операционных расходов – Сокращение итоговых расходов – Сопротивление коррозии – Безопасность.

Снижение веса Плотность стали превышает плотность композитов по следующим коэффициентам:

- 3.9 против эпоксидной смолы, армированной стекловолокном.
- 5.1 против эпоксидной смолы, армированной углеродным волокном.
- 5.8 против эпоксидной смолы, армированной кевларовым волокном.

Возможности снижения веса, если использовать композиты вместо стали, менее значительны. В большинстве предлагаемых в настоящее время решений их можно оценить приблизительно в 15–30 %.

12.4.2. Композиты и бетон

Преимущества композиционных материалов хорошо проявляются при армировании бетона и строительстве.

Недорогой и разносторонний, бетон является одним из лучших строительных материалов во многих предложениях. Являясь настоящим композитом, типичный бетон состоит из гравия и песка, связанных вместе в матрице из цемента, с металлической арматурой, обычно добавляемой для усиления прочности. Бетон превосходно ведет себя при сжатии, но становится хрупким и непрочным при растяжении. Растягивающие напряжения, так же как и пластическая усадка во время отверждения, приводят к трещинам, которые поглощают воду, что, в конечном счете, приводит к коррозии металлической арматуры и существенной потере монолитности бетона при разрушении металла.

Композитная арматура утвердилась на строительном рынке благодаря доказанному сопротивлению коррозии. Новые и обновленные конструкторские руководства и тестовые протоколы облегчают инженерам выбор армированных пластиков.

Усиленные волокнами пластики (стеклопластик, базальтопластик) с давних пор рассматривались как материалы, позволяющие улучшить характеристики бетона.

Композитная арматура: признанная технология.

За последние 15 лет композитная арматура перешла от экспериментального прототипа к эффективному заменителю стали во многих проектах, особенно в связи с повышением цен на сталь. «Стеклопластиковая арматура часто используется, и это очень конкурентный рынок».

Для некоторых конструкторских проектов, таких как оборудование для магниторезонансной томографии в больницах, или приближение к будкам-пунктам взимания дорожной опла-

ты, которые используют технологию радиочастотной идентификации для определения уже оплативших покупателей, композитная арматура является единственным выбором. Стальная арматура не может быть использована, потому как интерферирует с электромагнитными сигналами. В добавление к электромагнитной прозрачности, композитная арматура также необычайно стойкая к коррозии, легкая по весу – около одной четверти от веса аналогичной стальной, и является теплоизолятором, потому как препятствует протеканию тепла в строительных конструкциях.

Композитные сетки в сборных бетонных панелях: высокий потенциал углеродно-эпоксидные сетки *C-GRID* заменяют традиционную сталь или арматуру в сборных структурах в качестве вторичного армирования.

C-GRID является крупной сеткой из жгутов на основе углерода/эпоксидной смолы. Используется как замена вторичной стальной армирующей сетки в бетонных панелях и архитектурных приложениях. Размер сетки меняется как в зависимости от бетона и типа заполнителя, так и от требований к прочности панели

Армированный волокнами бетон: появление прочности.

Использование коротких волокон в бетоне для улучшения его свойств было признанной технологией на протяжении десятилетий, и даже веков, если принять во внимание, что в Римской Империи строительные растворы были армированы конским волосом. Армирование волокнами усиливает прочность и упругость бетона (способность к пластической деформации без разрушения) посредством удерживания части нагрузки при повреждении матрицы и препятствуя росту трещин.

«Добавление волокон позволяет материалу деформироваться пластично и выдерживать растягивающие нагрузки».

Усиленный волокнами бетон был использован для изготовления этих предварительно напряженных мостовых балок. Использование арматуры не потребовалось из-за высокой эластичности и прочности материала, которая была придана ему стальными армирующими волокнами, добавленными в бетонную смесь.

12.4.3. Алюминиевые композитные панели

Алюминиевый композитный материал – это панель, состоящая из двух алюминиевых листов и пластикового либо минерального наполнителя между ними. Композитная структура материала придаёт ему лёгкость и высокую прочность в сочетании с упругостью и стойкостью к излому. Химическая и лакокрасочная обработка поверхности обеспечивает материалу превосходную устойчивость к коррозии и температурным колебаниям. Благодаря сочетанию этих уникальных свойств, алюминиевый композитный материал является одним из наиболее востребованных в строительстве.

Алюминиевый композит обладает рядом существенных преимуществ, обеспечивающих ему растущую с каждым годом популярность как отделочного материала.

– Минимальный вес в сочетании с высокой жёсткостью. Панели АКМ отличаются низким весом, обусловленным применением алюминиевых покрывающих листов и облегченного центрального слоя в сочетании с высокой жесткостью, задаваемой комбинацией вышеуказанных материалов. В условиях применения на фасадных конструкциях данное обстоятельство выгодно отличает АКМ от альтернативных материалов, таких как листовые алюминий и сталь, керамический гранит, фиброцементные плиты. Применение алюминиевого композитного материала значительно снижает общий вес конструкции вентилируемого фасада.

– Плоскостность материала. Алюминиевый композитный материал способен противостоять скручиванию. Причина – в нанесении верхнего слоя методом прокатки. Плоскостность обеспечивается применением прокатки вместо обычной прессовки, которая дает высокую

равномерность нанесения слоя. Максимальная пологость составляет 2 мм на 1220 мм длины, что составляет 0,16 % от последней.

– Устойчивость лакокрасочного покрытия к воздействию окружающей среды. Благодаря чрезвычайно устойчивому многослойному покрытию материал в течение длительного времени не теряет интенсивность окраски под воздействием солнечного цвета и агрессивных компонентов атмосферы.

– Широкий выбор цветов и фактур. Материал выпускается с покрытием, выполненным лакокрасками: солидные цвета и цвета «металлик» в любом диапазоне цветов и оттенков, покрытиями под камень и дерево. Помимо этого выпускаются панели с напылением «хром», «золото», панели с фактурной поверхностью, панели с полированным покрытием из нержавеющей стали, титана, меди.

– Общая износостойкость. Панели АКМ имеют сложную структуру, образованную алюминиевыми листами и наполнителем центрального слоя. Сопряжение данных материалов обеспечивает панелям жесткость в сочетании с эластичностью, что делает АКМ устойчивым к нагрузкам и деформациям, создающимся окружающей средой. Материал не утрачивает своих свойств в течение чрезвычайно длительного времени.

– Коррозионная стойкость. Устойчивость материала к коррозии определяется применением в структуре панели листов алюминиевого сплава, защищенного многослойным лакокрасочным покрытием. В случае повреждения покрытия поверхность листа защищается образованием оксидной пленки

– Звукоизоляционные свойства. Композиционная структура панели АКМ обеспечивает хорошую звукоизоляцию, поглощая звуковые волны и вибрации.

– Обрабатываемость материала. Панели легко поддаются таким видам механической обработки как гибка, резка, фрезеровка, сверление, вальцовка, сварка, склеивание, без ущерба покрытию и нарушению структуре материала. При нагрузках, возникающих в процессе сгибания панелей, в том числе в радиус не отмечается расслаивание панелей либо нарушения поверхностных слоев, такие как растрескивание алюминиевых листов и лакокрасочного покрытия. При производстве на заводе панели защищаются от механических повреждений специальной пленкой, удаляемой после завершения монтажных работ.

– Придание формы. Панели легко принимают практически любую заданную форму, например радиусную. Пригодность материала к спаиванию позволяет добиваться сложной геометрии изделий, что невозможно ни с одним другим облицовочным материалом, кроме алюминия, перед которым АКМ значительно выигрывает по весу.

– Эстетичность конструкции. Применение алюминиевого композитного материала позволяет создавать панели облицовки различных размеров и форм, делает данный материал незаменимым при решении сложных архитектурных задач.

– Длительный срок службы. АКМ в течение длительного времени устойчивы к воздействию внешней среды, таким как солнечный свет, атмосферные осадки, ветровые нагрузки, колебания температуры, благодаря применению устойчивого покрытия и достигнутому в материале сочетанию жесткости и эластичности. Расчетный срок службы панелей на открытом воздухе составляет около 50 лет.

– Минимальный уход в процессе эксплуатации. Наличие высококачественного покрытия способствует самоочищению панелей от внешних загрязнений. Так же панели легко моются не агрессивными очистителями.

Два перспективных пути открывают комбинированные материалы, усиленные либо волокнами, либо диспергированными твердыми частицами.

У первых в неорганическую металлическую или органическую полимерную матрицу введены тончайшие высокопрочные волокна из стекла, углерода, бора, бериллия, стали или нитевидные монокристаллы. В результате такого комбинирования максимальная прочность

сочетается с высоким модулем упругости и небольшой плотностью. Именно такими материалами будущего являются композиционные материалы.

Композиционный материал конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются усиливающие его элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Примеры композиционных материалов: пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия.

Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

12.5. Производство и использование композиционных материалов в строительстве – новый этап качества

В начале XXI века не только строители, учёные, но и потребители задаются вопросом о будущих строительных материалах. Бурное развитие науки и техники затрудняет прогнозирование: еще несколько десятков лет назад не было широкого применения полимерных строительных материалов, хотя в ВУЗах были созданы кафедры, а о современных «истинных» композитах было известно только узкому кругу специалистов. Тем не менее, думаю, что можно утверждать, основными строительными материалами также будут металл, бетон и железобетон, керамика, стекло, древесина, полимеры. Строительные материалы будут создаваться на той же сырьевой основе, но с применением новых рецептур компонентов и технологических приемов, что повысит эксплуатационные характеристики и соответственно долговечность и надежность. Максимальное использование отходов различных производств, отработавших изделий, местного и домашнего мусора приведёт к тому, что строительные материалы будут выбираться по экологическим критериям, а их производство будет основываться на безотходных технологиях.

Уже сейчас имеется обилие фирменных названий отделочных, изоляционных и других материалов, которые в принципе отличаются только составом и технологией. Этот поток новых материалов увеличивается, а их эксплуатационные свойства совершенствуются с учетом суровых климатических условий и экономии энергетических ресурсов России.

После того как современная физика металлов подробно разъяснила нам причины их пластичности, прочности и ее увеличения, началась интенсивная систематическая разработка новых материалов. Это приведет, вероятно, уже в воображимом будущем к созданию материалов с прочностью, во много раз превышающей ее значения у обычных сегодня сплавов. При этом большое внимание будет уделяться уже известным механизмам закалки стали и старения алюминиевых сплавов, комбинациям этих известных механизмов с процессами формирования и многочисленными возможностями создания комбинированных материалов. Два перспективных пути открывают комбинированные материалы, усиленные либо волокнами, либо диспергированными твердыми частицами. У первых в неорганическую металлическую или органическую полимерную матрицу введены тончайшие высокопрочные волокна из стекла, углерода, бора, бериллия, стали или нитевидные монокристаллы. В результате такого комбинирования максимальная прочность сочетается с высоким модулем упругости и небольшой плотностью. Именно такими материалами будущего являются композиционные материалы.

Композиционный материал – конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются усиливающие его элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Примеры композиционных материалов: пластик, армированный

борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

В настоящее время достаточно много определений композитов, кроме вышеназванного можно дать такое, как «Композиты – многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или др. основы, армированные наполнителем из волокон».

И ещё одно определение (1–6):

Композиционные материалы представляют собой искусственные материалы сложных структур, составленные из двух и более мономатериалов с резко различными свойствами, приобретающие в результате такого сочетания комплекс новых свойств, не присущих исходным материалам.

Применение стеклопластиковой арматуры в строительстве становится более популярным. О чем, в первую очередь, свидетельствует распоряжение правительства Российской Федерации от 24 июля 2013г № 1307-р Развитие отрасли производства композитных материалов (далее – план). Использование связано с тем, что данная арматура превышает стальную по прочности на разрыв в 3 раза. При этом её плотность ниже в 10 раз, она имеет низких коэффициент теплопроводности и не образует мостиков холода, что увеличивает долговечность наружных стеновых панелей выполненных с армированием стеклопластиковой арматуры.

В Российской Федерации полимерные материалы (стеклопластики) для нужд строительства в промышленных масштабах производят в городах: ООО «Углемаш» г. Новокузнецк, ООО «ЦКМ» г. Новосибирск, ООО «Гален» респ. Чувашия, г. Чебоксары, ООО «Бийский завод стеклопластиков» (БЗС) г. Бийск и других. В Новосибирске так же открыто производство по выпуску стеклопластиковой арматуры. Контроль качества стеклопластиковой арматуры, производимой на заводах, выше перечисленных городов осуществляется в ООО «СибНИИстрой», подтверждение соответствия данной арматуры нормативной документации проводилась ООО «НОВОСИБСЕРТИФИКАЦИЯ».

ООО «СибНИИстрой» более 20 лет в оснащённой строительной лаборатории решает проблемы рецептурного и технологического характеров, а так же исследует влияние различных условий, в том числе климатических, на характер работы данной арматуры в изделиях и конструкциях.

Результаты испытаний: арматура композитная базальтопластиковая (пример):

Таблица 12.3

Маркировка заказчика	Маркировка ИЦ		Обозначение НД на продукцию	Нормативное значение		
1	2	3	4	5	6	7
АКБ 6	И-2802–1/20	Предельные отклонения от номинальных параметров, мм по наружному диаметру -по длине	ТУ 5714–007–13101102–2013	±0,3 +50	ТУ 5714–007–13101102–2013	-0,1 до +0,2 +1,1
АКБ 8						-0,1 до +0,1 +1,5
АКБ 10						-0,2 до +0,1 +1,3
АКБ 12						0 до +0,2 +1,7

1	2	3	4	5	6	7
АКБ 6	И-2802–1/20	Прочность при растяжении, МПа	ТУ 5714–007–13101102–2013	Не менее 1000	ТУ 5714–007–13101102–2013	1120
АКБ 8				Не менее 1000		1080
АКБ 10				Не менее 1000		1110
АКБ 12				Не менее 900		1010
АКБ 6	И-2802–1/20	Изгибающее напряжение, МПа	ТУ 5714–007–13101102–2013	Не менее 1000	ТУ 5714–007–13101102–2013	1150
АКБ 8				Не менее 900		1090
АКБ 10				Не менее 900		1040
АКБ 12				Не менее 900		1070
АКБ 6	И-2802–1/20	Модуль упругости, ГПа	ТУ 5714–007–13101102–2013	Не менее 50	ТУ 5714–007–13101102–2013	64,7
АКБ 8				Не менее 50		70,4
АКБ 10				Не менее 50		79,1
АКБ 12				Не менее 50		85,2

В настоящее время стеклопластиковая арматура зарекомендовала себя не только при производстве крупнопанельных изделий, в которых она используется в качестве гибких связей, но и в малоэтажном домостроении. В последнем случае стеклопластиковая арматура используется при укладке ленточного фундамента, изготовления буровых свай, элементов перекрытия, бетонирования отмостки зданий, при армировании стен в монолитном домостроении кирпичной кладки и т.д. При использовании этой арматуры в стеновых панелях улучшается внешний вид здания путем исключения потёков и ржавых пятен.

Применение данного вида арматуры основывается на её преимуществах по сравнению со стальной арматурой, а именно:

- повышенная прочность на разрыв;
- высокая коррозионная стойкость;
- повышенная упругость;
- низкая теплопроводность;
- высокая морозостойкость;
- высокая стойкость к резким перепадам температуры;

Не металлическую композиционную арматуру рекомендуется использовать в бетонах, которые характеризуются пониженным защитным действием к стальной арматуре:

- в бетонах на портландцементе с содержанием щелочей менее 0,6%, шлако-портландцементе, пуццолановом цементе, смешанных вяжущих;
- в монолитных бетонах, изготовленных с хлорсодержащими противоморозными добавками, не содержащими щелочей;
- в крупнопористых бетонах для дренажных труб, легких крупнопористых бетонах, ячеистых бетонах;

Применение данного типа арматуры основывается на её преимуществе по отношению к стальной арматуре, а именно:

- повышение прочности на разрыв;
- не подвержен коррозии;
- арматура устойчива к химической агрессивной среде;
- материал отличается повышенной упругостью;
- обладает очень низким коэффициентом теплопроводности;
- арматура не изменяется под воздействием электромагнитных волн;
- арматура морозостойкая, устойчивая к частым перепадам температуры;
- отсутствие ограничений по длине.

По мнению многих экспертов, данная арматура не может полностью заменить традиционную стальную, в связи с её высокой стоимостью.

В настоящее время стеклопластиковая арматура рекомендуется при применении ее в наружных слоях 3-х слойных панелях, для гибких связей, для изучения внешнего вида зданий (отсутствие потёков, ржавчин), а также для повышения теплотехнических характеристик стеновых конструкций (в слоистых стенах с гибкими связями).

Неметаллическую композиционную арматуру рекомендуется использовать в бетонах, которые характеризуются пониженным защитным действием по отношению к стальной арматуре:

а) в бетонах на портландцемент с содержанием щёлочей не более 0,6 %, шлакопортландцементе, пуццолановом цементе; смешанных вяжущих;

б) в монолитных бетонах для с хлоридсодержащими противоморозными добавками, не содержащими щелочей;

в) в крупнопористых бетонах для дренажных труб, лёгких крупнопористых бетонах, монолитных ячеистых бетонах;

г) для армирования конструкций подвергающихся воздействию агрессивных хлоридных сред: тротуарных плиток, дорожных покрытий и др.

Однако композитная арматура по сравнению со стальной обладает рядом существенных недостатков:

- низкий модуль упругости. Вследствие чего при армировании ниже определенного уровня и при незначительных напряжениях в арматуре, разрушения композитобетонной изгибаемой конструкции происходит по бетону. Такой характер разрушения невозможен при использовании стальной арматуры. В следствии чего потенциальные прочностные показатели композитной арматуры в подавляющем большинстве случаев остаются нереализованными. Учитывая данное обстоятельство, на стадии расчета обязательным является контроль минимального процента армирования индивидуально для каждого расчетного случая. При использовании композитной арматуры его величина не может иметь фиксированного значения, которая, к примеру, в американских нормах является функцией расчетного сопротивления арматуры и геометрических параметров сечения.

- низкая огнестойкость изделий, армированных композитной арматурой. Огнестойкость изделий в значительной степени зависит от конструкции типа ее армирования и величины защитного слоя. Экспериментальные данные свидетельствуют, что минимальное значение предела огнестойкости составляет 13 мин для изгибаемых конструкций, при этом разрушение является хрупким. При интенсивном разогреве рабочей арматуры до 100 °С происходит активное выделение пара из смежных со стержнем микротрещин бетона. При этом мгновенно повышается давление на поверхности арматуры, что приводит к разрушению волокна. Логично предположить, что предел огнестойкости может значительно отличаться для различных производителей арматуры, а также зависеть от материала ровинга. Однако, очевидно, что композитную арматуру нельзя применять без специальных конструктивных мероприятий либо дополнительной огнезащиты несущих конструкций, к которым предъявляются требования по огнестойкости.

- невозможность изготовления гнутых арматурных изделий из арматуры в состоянии поставки. Без гнутых изделий (хомутов, гнутых стержней, шпилек и т.д.) осуществить армирование конструкции невозможно. Фактически производитель работ должен комплектовать объект арматурными изделиями исключительно по договоренности с производителем арматуры, что потенциально несет в себе значительные организационные сложности.

- невозможность использования в качестве сжатой арматуры.

- значительно более высокая стоимость.

Применение композитной арматуры целесообразно и эффективно только при необходимости использования ее свойств, которыми стальная арматура не обладает.

Помимо технических препятствий для широкого применения композитной арматуры существуют значительные организационные трудности:

- не существует единых требований на уровне государственных или международных стандартов к механическим свойствам, методам контроля и правила приемки арматуры;
- ввиду принципиального отличия диаграммы деформирования композитной арматуры от стальной не существует понимания по назначению расчетных характеристик. Как правило, расчетные характеристики либо не известны вовсе, либо указываются производителем на основании индивидуальных соображений;
- отсутствует четкая терминология и классификация, дифференциация на напрягаемую и ненапрягаемую арматуру, с соответствующими требованиями к ней;
- не стандартизированы методики расчета композитобетонных конструкций;
- не стандартизированы методики расчета минимального процента армирования;
- недостаточно изучен опыт эксплуатации изделий с данной арматурой;
- во многих случаях неверное позиционирование по области применения;
- отсутствуют нормативные требования по ширине раскрытия трещин в конструкциях с композитной арматурой;
- не используется единая методика для контроля механических свойств композитной арматуры;
- не нормированы требования и не контролируются характеристики сцепления композитной арматуры с бетоном.

Для расширения области широкого применения композитной арматуры в строительстве необходимо выполнить следующие мероприятия:

- разработать стандарты, регламентирующие требования к качеству арматуры, ее механическим свойствам и методам контроля;
- разработать строительные нормы, регламентирующие правила расчета и конструирования композитобетонных конструкций и устанавливающие требования к контролируемым параметрам в предельных состояниях;
- подготовить предложения по оценке характеристик периодического профиля арматуры;
- разработать типовые решения, обеспечивающие требуемый уровень огнестойкости композитобетонных конструкций;
- стандартизировать гнутые изделия и разработать правила их приемки.

До реализации данных мероприятий выполнять проектирование композитобетонных конструкций возможно только с использованием зарубежных норм проектирования и исключительно под арматуру конкретного производителя.

Повышение качества и долговечности строительных конструкций зданий и сооружений различного назначения – проблема, требующая комплексного решения. Учитывая, что одним из ведущих параметров обеспечения долговечности железобетонных конструкций является сохранность в них арматуры, замена металлической арматуры на композитные материалы имеет первостепенное значение. Разработана и применяется для армирования несущих и ограждающих конструкций в последнее время композиционная полимерная арматура (стеклопластиковая, базальтопластиковая, базальтопластиковая с применением углеродного волокна).

В 2000 г. ИЦ СМИК «СибНИИстрой», Бийский завод стеклопластиков и центром по сертификации гибких связей из композиционных материалов ИЦ «Стройэксперт» была составлена и выполнена программа исследований, результаты которой легли в основу технических стандартов. Можно привести выдержки из программы:

- «разработать согласованные тексты методик проведения испытаний по предложенной программе и отработать их в условиях БЗС (на базе методик разработанных в ходе выполнения программы 2296–001–20994511–01 ПР;
- разработать и предоставить для изготовления чертежи всей оснастки и нестандартных приборов для проведения испытаний;

– силами лаборатории 7 ИЦ СМИК «СибНИИстрой» провести испытания стеклопластиковой арматуры, изготавливаемой БЗС по ТУ 2296–001–20994511, а их результаты предоставить и положить в качестве нормативной базы для оценки пригодности арматуры из композиционных материалов для применения в гибких связях;

– разработать (для последующего совместного выпуска) первую редакцию ГОСТ «Арматура из композиционных материалов. Общие технические требования», который будет служить юридической основой проведения сертификационных испытаний». Внутреннее стекло пластиков задерживалось из-за отсутствия их с требуемыми свойствами. Однако, в настоящее время такие стеклопластики начали выпускаться промышленностью.

В 2004 г. были разработаны технические условия на стеклопластиковую арматуру периодического профиля в НИИЖБ совместно с ООО «АСП». Арматура имела ограниченную область применения. Прочность на растяжение составляла до 1200 МПа, модуль упругости 50000 МПа. В последующие годы технология производства совершенствовалась. На основе различных связующих в т. ч. полиэфирных смол на стойкость к щелочной среде бетона были произведены испытания.

В результате проведенных работ на композитную арматуру периодического профиля разработаны технические условия на использование её в армированных конструкциях.

Арматуры композитная полимерная позволяет создать экологически безопасные, комфортные условия в зданиях и сооружениях, т. к. исключает мостики холода, экранирование в бетонных конструкциях, снижает плотность материала в 4–4,5 раза.

В настоящее время разработан межгосударственный стандарт ГОСТ 31938–2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» [1]. Подготовлены проекты стандартов на методы испытаний и правила расчета и проектирования строительных конструкций с арматурой композитной полимерной.

Разработанная нормативно техническая документация направлена на формирование единых требований к арматуре. В соответствии с этими документами необходимо проведение испытаний несущих конструкций для получения статистических данных по деформациям и ширине раскрытия трещин. Получение таких данных позволит ввести в расчёт необходимый коэффициент обеспечения надёжности конструкции, армируемых композитно– полимерной арматурой.

Стеклопластики представляют собой материал, состоящий из армирующего стеклонаполнителя на основе стекла Е, пропитанного гермореактивным связующим и изготовленный методом пултрузии. Стеклопластики предназначены для изготовления профильных изделий для строительных конструкций. Стеклопластики могут применяться в интервале рабочих температур от плюс 80 до минус 60 °С. Физико-механические характеристики «СППС-240/СППС-340): предел прочности при растяжении по ГОСТ 11262 – вдоль не менее 220/280 МПа, поперек не менее 70/100 МПа; предел прочности при изгибе по ГОСТ 4648 – вдоль не менее 240/280 МПа, поперек не менее 100 МПа; предел прочности при сдвиге по ТУ 2296–005–39790001–2003 – не менее 25 МПа.

Элементы конструкций из стеклопластиковых профилей различного сечения, соединяемые между собой стальными или композитными крепежными изделиями, для возведения различных сооружений, в том числе пешеходных мостов и путепроводов, эксплуатируемых в рабочем интервале от минус 60 до плюс 80 °С. Допускаемые отклонения: по длине элемента ± 10 мм, по расстоянию между соседними узлами крепления $\pm 1/3000$ длины, но не более ± 3 мм.; по плоскостности узловых соединений ± 3 мм.

СибНИИСтроем разработаны ТУ по созданию конструкций пролетом 9–18 м из композиционных материалов.

Пролетные строения с железобетонной плитой и многораскосными фермами из композиционных материалов для автодорожных мостов (4.5) должны соответствовать требованиям настоящих технических условий и рабочим чертежам, разработанным по СП 35.13330.

Поперечный разрез автодорожного пролетного строения представлен на рисунке 12.4.

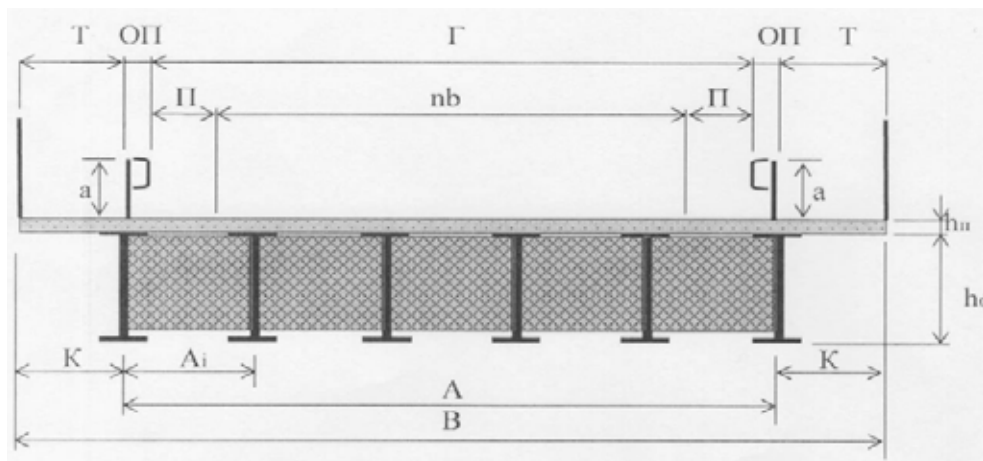


Рис. 12.4. Пролетное строение автодорожное. Поперечный разрез

где nb – общая ширина проезжей части или ширина проезжей части для движения одного направления, где n – число полос движения и b – ширина полосы; Π – полосы безопасности (предохранительные полосы); ОП – ширина ограждений проездов (типовой проект); Γ – расстояние между ограждениями проезда; T – ширина тротуаров согласно п. 5.61 СП 35.13330.2011; a – высота ограждений проездов согласно п. 5.62 СП 35.13330.2011; h_n – толщина железобетонной плиты проезжей части (определяется проектом); h_ϕ – высота фермы (определяется проектом); K – консоль плиты (определяется проектом); A_i – расстояние между соседними фермами (определяется проектом); A – расстояние между крайними фермами; N – количество ферм в сечении пролетного строения (определяется проектом); B – общая ширина пролетного строения.

Более подробно чертежи пролетного строения с железобетонной плитой и многораскосными фермами из композиционных материалов представлены в конструкторской, технологической ООО «Сибирские проекты» (Шифр 2011–06-ИС-ОКР». Конструкторская документация (КД) », «Технологическая документация (ТД) », 2012).

Изготовление и испытание опытного образца представлены в отчетах ООО «ОПОРА» (Общая пояснительная записка; Отчет об изготовлении опытного образца; Отчет об испытании опытного образца «Опытно-конструкторская разработка. Пролетное строение с железобетонной плитой и фермами из композитных материалов», 2012).

Изготовление автодорожных пролетных строений осуществлялось с применением следующих материалов:

1) Ферма пролетного строения:

– «Стеклопластик профильный Пултрузионный Строительный» СППС-240 – по ТУ 2296–005–39790001–2003;

– болт М12–6g×55...115.110 ХЛ1 СтЗсп по ГОСТ 7798;

– гайка М12–6Н.ХЛ1 СтЗсп по ГОСТ 5915;

– шайба 12 СтЗсп по ГОСТ 11371;

2) Диафрагма пролетного строения:

– «Стеклопластик профильный Пултрузионный Строительный» СППС-240 по ТУ 2296–005–39790001–2003;

– болт М12; М16 СтЗсп по ГОСТ 7798;

– гайка М12; М16 СтЗсп по ГОСТ 5915*;

– шайба М12; М16 СтЗсп по ГОСТ 11371;

3) Плита проезжей части пролетного строения:

– бетон (класс по прочности В30, марка по водонепроницаемости W6, марка по морозостойкости F300) по ГОСТ 26633;

– арматура А400 (А-III) марки 25Г2С по ГОСТ 5781;

– арматура А240 (А-I) марки СтЗсп по ГОСТ 5781;

Таблица 12.4

Пролетное строение автодорожного длиной (L) 9,0 м в миллиметрах

Габарит	Количество ферм	Ширина тротуаров *	Ширина проезжей части	Ширина полос безопасности	Ширина ограждений проездов	Высота ограждений проездов	Расстояние м/у соседними фермами**	Расстояние м/у крайними фермами**	Длина консоли плиты**	Толщина железобетонной плиты проезжей части**	Высота фермы**	Ширина пролетного строения**	Общая длина пролетного строения	Расчетная длина пролетного строения	Расстояние м/у диафрагмами
Г	N	T	nb	П	П	a	A ₁	A	K	h _н	h _ф	B	L	L _р	L _д
Г-4,5	6	750(2)	3500	500	500	750	1200	6000	500	от 170 до 240	770	7000	9000	8700	3000
Г-4,5	6	750(1)	3500	500	500	750	1100	5500	350/400	от 170 до 240	770	6250	9000	8700	3000
Г-4,5	6	(0)	3500	500	500	750	1000	5000	250	от 170 до 240	770	5500	9000	8700	3000
Г-4,5	6	1000(2)	3500	500	500	750	1300	6500	500	от 170 до 240	770	7500	9000	8700	3000
Г-4,5	6	1000(1)	3500	500	500	750	1200	6000	250	от 170 до 240	770	6500	9000	8700	3000
Г-4,5	6	1500(1)	3500	500	500	750	1200	6000	500	от 170 до 240	770	7000	9000	8700	3000

Примечания. 1* – в скобках дано количество тротуаров («0» – нет тротуаров; «1» – с одной стороны; «2» – с двух сторон); 2. ** – размеры уточняются в процессе проектирования.

– закладные детали упоров из стали 09Г2С по ГОСТ19281, петлевые анкера из стали А300 (А-II) Ст5 по ГОСТ 5781, ГОСТ 380.

Пригодность элементов конструкций (в том числе несущих) из стеклопластиков СППС для применения в строительстве подтверждается Техническим свидетельством № 3464–11 Мин-регионразвития РФ от 28.11.2011.

Основные параметры, номенклатура и геометрические размеры автодорожных пролетных строений длиной 9,0 м приведены в табл. 12.4, а так же в проектной документации.

Вертикальные упругие прогибы пролетных строений, вычисленные при действии подвижной временной вертикальной нагрузки не должны превышать $L/400$, где L – расчетная длина пролета, м.

Строительный подъем и очертание профиля покрытия железобетонных пролетных строений автодорожных и городских мостов следует предусматривать такими, чтобы после проявления деформаций от ползучести и усадки бетона (но не позднее двух лет с момента действия полной постоянной нагрузки) алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля по осям полос движения в местах сопряжения пролетных строений между собой и с подходами не превышала:

– при отсутствии на мосту подвижной временной вертикальной нагрузки – значений, приведенных в табл. 12.5;

– при загрузке моста подвижной временной вертикальной нагрузкой по осям полос движения – 24‰ для нагрузок АК и НК.

На пролетных строениях, отдельных под направления встречного движения, тротуары устраивают только с одной – наружной стороны.

Минимальную ширину тротуаров принимают равной 1,0 м, а в городах и населенных пунктах – 1,5 м. При большей ширине тротуаров ее назначают равной 1,5; 2,25 м и далее – кратной 0,75 м. При соответствующем обосновании допускается принимать ширину тротуаров не кратную 0,75 м.

При отсутствии регулярного пешеходного движения (менее 200 чел/сут) устраивают служебные проходы шириной 0,75 м (с одной или с обеих сторон мостового сооружения).

Таблица 12.5

Алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля

Расчетные скорости движения одиночных легковых автомобилей на участках дороги, примыкающих к мосту, км/ч	Алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля, %
от 150 до 100	8
80	9
70	11
60	13
40	17

Примечания. 1 До проявления длительных деформаций алгебраическая разность сопрягаемых уклонов продольного профиля при отсутствии на мосту подвижной временной вертикальной нагрузки может превышать значения, приведенные в таблице 1, не более чем в 2 раза. 2 В температурно-неразрезных пролетных строениях, объединенных по плите проезжей части, алгебраическую разность сопрягаемых уклонов продольного профиля следует определять без учета влияния соединительной плиты

Тротуары на мостовом сооружении должны быть отделены от проезжей части ограждающими устройствами барьерного или парапетного типа.

Над деформационными швами пролетного строения в ограждении должна быть обеспечена возможность перемещения, соответствующего перемещению в деформационном шве, при сохранении в зоне перекрытия деформационного шва требуемой удерживающей способности ограждения.

Расчетные периоды собственных колебаний (в незагруженном состоянии) по двум низшим формам (в балочных разрезных системах – по одной низшей форме) не должны находиться в интервале от 0,45 до 0,6 сек – в вертикальной плоскости и в интервале от 0,9 до 1,2 сек – в горизонтальной плоскости. При этом следует учитывать возможность загрузки пролетных строений толпой, создающей нагрузку 0,49 кПа (50 кгс/м²).

Динамические характеристики первых форм колебаний по результатам испытаний пролетного строения представлены в табл. 12.6.

Таблица 12.6

Динамические характеристики первых форм колебаний пролетного строения

Направление колебаний	Ферма	Период колебаний, сек			Логарифмический декремент затухания		
		до испытаний	под полной нагрузкой	после испытаний	до испытаний	под полной нагрузкой	после испытаний
Вертикальные	левая	0,097	0,157	0,096	0,121	0,107	0,076
	правая	0,096	0,157	0,096	0,108	0,075	0,078
	среднее	0,097	0,157	0,096	0,115	0,091	0,077
Поперечные	левая	0,181	0,273	0,175	0,375	0,107	0,142
	правая	0,179	0,274	0,176	0,131	0,179	0,179
	среднее	0,180	0,273	0,175	0,253	0,143	0,161

Защита железобетонной плиты автодорожного пролетного строения обеспечивается полимерным износостойким покрытием по ГОСТ Р 53627.

Все слои должны иметь сцепление между собой и с плитой проезжей части, а верхний слой покрытия также обладать необходимой шероховатостью.

Конструкции деформационных швов должны обеспечивать перемещения пролетных строений в заданном интервале температур, не нарушать плавности движения транспортных средств и исключать попадание воды и грязи на опорные площадки и нижерасположенные части мостового сооружения.

Конструкции деформационных швов следует анкеровать в несущих элементах пролетных строений.

Анкеровка конструкций деформационных швов в дорожной одежде не допускается.

Конструкции швов должны быть рассчитаны на воздействия ударных нагрузок при проходе транспортных средств и обладать устойчивостью против истирания.

В качестве композитного материала при изготовлении автодорожных и пешеходных пролетных строений не применялся пултрузионный стеклопластик марки не ниже СППС-240 (240 – марка стеклопластика, указывающая на предел его прочности при растяжении в МПа).

Стеклопластик соответствовал требованиям ТУ 2296–005–39790001–2003 и ТУ и изготавливался в соответствии с технологическим процессом. Пригодность для применения стеклопластика марки СППС-240 в строительстве подтверждается Техническим свидетельством Минрегионразвития РФ № 2850–10 от 18.05.2010 г.

По основным физико-механическим свойствам стеклопластик должен соответствовать требованиям, указанным в таблицах 12.7 и 12.8.

Таблица 12.7

Значения сопротивлений стеклопластика СППС-240

Вид напряженного состояния		Значения сопротивлений, МПа		
		Среднее, R	Нормативное, R_N	Расчетное, R_s
Растяжение	продольное (1)	240	184,1	98,8
	поперечное (2)	50	38,4	13,7
Сжатие	продольное (1)	220	150,8	82,2
	поперечное (2)	70	55,3	26,0
Изгиб	продольный (1)	240	184,1	98,8
	поперечный (2)	100	76,7	27,4
Сдвиг		25	20,7	10,2
Скалывание при расчёте соединений	продольное (1)	38	29,1	14,3
	поперечное (2)	25	19,2	8,1

Таблица 12.8

Физические показатели стеклопластика СППС-240

Наименование показателя	Стеклопластик СППС-240
1. Плотность, кг/м	1900 ± 100
2. Водопоглощение, %, не более	0,5

Поставляли профили отрезками длиной от 200 мм до 12000 мм с предельным отклонением от номинальной длины 5 мм для профилей от 200 до 1500 мм, 10 мм – для профилей от 1500 мм до 12000 мм.

Стеклопластик обрезался по сечению перпендикулярному направлению вытяжки. Расслоения и трещины на торцах не допускались.

Поверхность должна быть гладкой, без посторонних включений, расслоений и трещин.

Стеклопластик брался таким, чтобы мог допускать механическую обработку: обточку, фрезерование, распиловку и сверление без образования трещин и сколов при условиях соблюдения режимов обработки, устанавливаемых изготовителем в соответствии со свойствами стеклопластика.

Установление дополнительных требований к стеклопластику проводилось по совместному согласованию изготовителя и заказчика и оговариваться в контракте (договоре) на поставку.

Для изготовления пролетных строений применялся тяжелый бетон по ГОСТ 25192 и ГОСТ 26633 средней плотностью от 2200 до 2500 кг/м³ включительно.

Класс бетона по прочности на сжатие должен был быть не ниже В30, марка по морозостойкости соответствовала требованиям проектной документации.

Расход цемента на 1 м³ бетона не превышал для бетона класса до В35 включительно – 435 кг, В40–490 кг, В45–540 кг.

Укладку, тепловлажностную обработку и уход за бетоном производить в соответствии с требованиями СНиП 3.06.04.

Отпускная прочность бетона должна соответствовать требованиям, установленным в проектной документации.

Вода для затворения бетонной смеси соответствовала требованиям ГОСТ 23732.

Для приготовления тяжелого бетона используется портландцемент марки не ниже М500 по ГОСТ 10178.

В качестве крупного заполнителя применяется щебень фракции 5–20 мм по ГОСТ 8267, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 26633.

В качестве мелкого заполнителя для бетона применяется кварцевый песок с модулем крупности $M_k = 2,0–2,5$ по ГОСТ 8736, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 26633.

Армирование плиты проезжей части в пролетных строениях производится в соответствии с проектной документацией.

Для армирования плиты проезжей части применяются сталь арматурная горячекатаная классов А-II и А-III по ГОСТ 5781, а также сталь петлевая по ГОСТ 380.

Условия применения марок сталей для плиты проезжей части следует принимать в соответствии с табл. 29 и 30 СНиП 2.05.03 как для элементов с арматурой, рассчитываемой на выносливость в зависимости от средней температуры наружного воздуха наиболее холодной пятидневки в районе строительства с обеспеченностью 0,92 в соответствии со СНиП 23–01. Отклонения от проектных размеров не превышало величин, приведенных в табл. 12.9.

Таблица 12.9

Наименование размеров	Допустимые отклонения от размеров, мм
Габаритный размер и расстояние между крайними стержнями:	
по длине арматурного изделия	$\pm 5,0$; -10
по ширине до 1500 мм	$\pm 5,0$
по ширине свыше 1500 мм	$+7$; -10
по высоте до 100 мм	$+3$; -5
свыше 100 до 250 мм	$\pm 5,0$
свыше 250 до 400 мм	$+5$; -7
свыше 400 мм	$+5$; -10
Расстояние между стержнями:	
до 100 мм	$\pm 5,0$
свыше 100 мм	$\pm 10,0$
Расстояние от крайнего стержня до любого другого, если они являются выпусками	$\pm 5,0$
Расстояние между распределительными стержнями в одном ряду	$\pm 25,0$
Закладные детали:	
по длине и ширине	$\pm 10,0$
по толщине	$+2$; -1
Отклонение поверхности от плоскости при проверке металлической линейкой длиной 1 м, устанавливаемой на ребро (кроме закладных деталей для приварки опорных частей)	1,5
Для закладных деталей для приварки опорных частей	0,3
Отклонение в положении анкеров	$\pm 10,0$
Отклонение размеров анкерных стержней по длине	$\pm 10,0$

Для закладных изделий, деформационных швов и прочих расчетных элементов применяли стальной прокат и другие изделия согласно требованиям раздела 8 СП 35.13330.

Расстояния в свету между отдельными арматурными элементами, а также стенками каналов обеспечивалось требуемое заполнение бетонной смесью всего объема конструкции.

Применение импортных арматурных сталей допускалось только при условии обязательной приемочной проверки, независимо от наличия сертификатов, включающей механические испытания, оценку эффективности периодического профиля, оценку свариваемости.



Мост из стеклопластика через р. Пашенка



Строительство моста из стеклопластика
через р. Пашенка



Мост через р. Пашенка



Мост из стеклопластика через р. Пашенка

При изготовлении и установке арматурных изделий, закладных изделий должны соблюдаться требования ГОСТ 10922, ГОСТ 13015 и СНиП 3.06.04.

Шаг (расстояние между осями) рабочей арматуры плиты в середине пролета и над ее опорами не должен превышать 20 см в плитах проезжей части автодорожных мостов.

Защита от коррозии всех металлических деталей и крепежных элементов должна обеспечивать их эксплуатацию в течение всего срока службы конструкции и не требовать дополнительных лакокрасочных покрытий.

Пролетные строения маркировались несмываемой краской при помощи трафаретов, резиновых или металлических штампов на стенке концевого участка в соответствии с ГОСТ 13015 с указанием:

- товарного знака предприятия-изготовителя или его краткого наименования;
- габарита пролетного строения;
- штампа ОТК или заводской инспекции;
- даты изготовления;
- массы пролетного строения.

Требования безопасности, охрана окружающей среды, а также порядок их контроля проводился по документации на производство пролетных строений (технологический регламент), согласно действующей нормативной, технической документации, а также в соответствии с санитарными нормами, методиками и другими документами, утвержденными органами здравоохранения.

Материалы, используемые при изготовлении балок, соответствовали нормам радиационной безопасности (НРБ-99).

При производстве балок соблюдались требования пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004 и противопожарных норм по СНиП 21–01.

Класс пожарной опасности конструкций пролетных строений из композитных материалов должен соответствовать классификации К1 согласно СНиП 21–01. При этом предел огнестойкости конструкций должен соответствовать классификации RE60 по ГОСТ 30247.0.

В настоящее время развитие и увеличение объема внутреннего производства композитных материалов невозможно без создания полноценной комплексной системы нормативно-технических, законодательных документов, регулирующих производство.

На основе этих документов подтверждение соответствия.;

Применение композитных материалов в смежных отраслях экономики;

Без формирования государственной политики, обеспечивающей вопросы ценообразования, а также поддержки малого бизнеса, реализации мер стимулирования спроса на продукцию отрасли композитных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айрапетов Д. П. Архитектурное материаловедение. М.: Стройиздат. 1983.
2. Айрапетов Д. Г. Материал и архитектура М.: Стройиздат. 1978.
3. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона М.: Стройиздат. 1981.
4. Баженов Ю. М., Комар А. Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1984.
5. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов. М.: Стройиздат, 1975.
6. Байболов С. М. Экология и системы менеджмента /Байболов С. М., Белан И. В., Белан В. И. // Экология и новые технологии в строительном материаловедении. – Междунар. сб. научн. тр. Новосибирск: НГАУ-РАЕН, 2010. – с. 131–133.
7. Белан В. И. Сухие смеси с микроармирующими добавками в производстве отделочных строительных материалов / Белан И. В., Белан В. И., Пичугин А. П., Байболов С. М. // Ресурсосберегающие технологии и эффективное использование местных ресурсов в строительстве. – Междунар. сб. научн. тр. Новосибирск. – НГАУ-ТГАСУ-РАЕН, 2013. – с. 168–171
8. Белан В. И. Сухие строительные смеси специального назначения /Белан В. И., Белан И. В., Нерадовский Е. Г., Пичугин А. П. // Ресурсосберегающие технологии и эффективное использование местных ресурсов в строительстве. – Междунар. сб. научн. тр. Новосибирск – НГАУ-ТГАСУ-РАЕН, 2013 – с. 348–358.
9. Белан И. В. Перспективы развития промышленности строительных материалов в Новосибирской области / Белан И. В. // Экология и новые технологии в строительном материаловедении. – Междун. сб. научн. тр. Новосибирск – НГАУ-РАЕН, 2010. – с. 141–144.
10. Белан И. В. Разработка составов сухих строительных смесей с повышенными эксплуатационными характеристиками / Белан И. В., Акчурина Т. К., Пичугин А. П., Хританков В. Ф. // Известия Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – № 2 14 с. 34–38.
11. Бирюлев В. В., Кошин И. И., Крылов И. И., Сильвестров А. В. Проектирование металлических конструкций. Л.: Стройиздат, 1990.
12. Бердов Г. И., Аронов Б. Л. Экспрессный контроль и управление качеством цементных материалов. Новосибирск. НГУ. 1992.
13. Венюа И. Цементы и бетоны в строительстве. М.: Стройиздат, 1980
14. Вербицкий Г. П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М.: Стройиздат, 1976.
15. Городецкий С. А., Бареев В. И., Пичугин А. П. Реологические исследования пропиточных композиций // Строительное материаловедение: состояние, тенденции и перспективы развития. Междунар. сб. научн. трудов. Новосибирск, Стройсиб-2011. – С. 145–151
16. Горчаков Г. И., Баженов Ю. М. Строительные материалы. М.: Стройиздат, 1986
17. Горчаков Г. И., Орантликер Л. П., Савич В. И. Состав, структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1973.
18. Гришко И. М., Королев И. В., Борщ И. М., Мищенко Г. М. Дорожно-строительные материалы. М.: Транспорт, 1983.
19. ГОСТ 31938–2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия», 2014 г.
20. Дворкин Л. И., Соломатов В. И., Выровой В. И., Гудновский С. М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Киев: Будивельник, 1991.
21. Дворкин Л. И. Строительные материалы гидротехнических сооружений. Киев: Вища школа, 1977.
22. Дворкин Л. И., Цулукидзе П. П. Строительные материалы для гидротехнических сооружений. М.: Энергия, 1978

23. Дворкин Л. И., Соляной И. А., Бойко И. Ф. Материалы и изделия в мелиоративном строительстве. Киев. Будивельник, 1982.
24. Денисов Г. А. Производство и использование сухих строительных смесей // Строительные материалы XXI века. – 2011, № 1. – С. 14–17
25. Зайцев Ю. А. Механика разрушения для строителей. М.: Высшая школа, 1991.
26. Золошлаковые материалы и золоотвалы. Под ред. Пантелеева Н. Н. М.: Энергия, 1978.
27. Изготовление прогрессивных железобетонных транспортных конструкций. Под ред. Палагина Е. В. М.: Транспорт, 1983.
28. Информационно-аналитический и производственный журнал «Проектирование и строительство в Сибири» № 4(75), 2013.
29. Кисина А. М., Киценко В. И. Полимербитумные кровельные и гидроизоляционные материалы. Л.: Стройиздат, 1983.
30. Книгина Г. И., Завадский В. Ф. Микрокалориметрия минерального сырья в производстве строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987.
31. Кудяков А. И. Минеральное сырье Томской области и рациональное его использование в технологии бетона. Томск ТГУ, 1991.
32. Мгедлов-Петросян О. П., Ушеров-Маршак А. В., Урженко А. М. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов. М.: Стройиздат, 1984.
33. Пичугин А. П., Городецкий С. А., Бареев В. И. Коррозионностойкие материалы для защиты полов и инженерных систем сельскохозяйственных зданий и сооружений. Монография/ НГАУ-РАЕН, – Новосибирск, 2010. – 142с.
34. Пичугин А. П. Сухие строительные смеси с повышенной адгезионной способностью/ Пичугин А. П., Белан И. В., Хританков В. Ф. //Строительные материалы. – 2014. –№ 7. – с. 45–48.
35. Пичугин А. П. Сухие строительные смеси с повышенными эксплуатационными характеристиками / Пичугин А. П., Хритагков В. Ф., Белан И. В. // Новосибирск: НГАУ-РАЕН, 2014. –165с.
36. Попченко С. Н. Гидроизоляция сооружений и зданий. Л.: Стройиздат, 1981.
37. Райхслъ В., Конрад Д. Бетон. М.: Стройиздат, 1979, с. 26.
38. Рыбьев И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1978.
39. Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне. М.: Стройиздат. 1986.
40. Распоряжение Правительства РФ от 24 июля 2013 г. № 1307-р О плане мероприятий («дорожная карта») «Развитие отрасли производства композитных материалов».
41. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Сиренко А. В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Киев: Будивельник, 1991.
42. Справочник по производству сборных железобетонных изделий. Под ред. Михайлова К. В., Фоломеева А. А. М.: Стройиздат, 1982.
43. Строительные материалы. Справочник. Под ред. Болдырева А. С., Золотова П. П. М.: Стройиздат, 1989.
44. Судаков В. Б. Рациональное использование бетона в гидротехнических сооружениях. М.: Энергия, 1976.
45. Судаков В. Б., Толкачев Л. А. Современные методы бетонирования высоких плотин М.: Энергоатомиздат. 1988
46. Хрулев В. М. Производство изделий из дерева и пластмасс. М.: Высшая школа, 1982.
47. Технические условия. Автодорожное пролётное строение длиной 18,0 м.с железобетонной плитой и многокаркасными фермами из композитных материалов. ТУ 5264–546–39124899–2013.2013 г.

48. Технические условия. Автодорожное пролётное строение длиной 9,0 м.с железобетонной плитой и многокаркасными фермами из композитных материалов. ТУ 5264–545–39124899–2013.2013 г.
49. Гае К В., Чистов Ю. А., Лобзина Ю. В. Технология производства строительных материалов, изделий, конструкций. М.: Высшая школа, 1988
50. Чехов М. А., Сергеев Л. М., Диоров Г. Д. Справочник по бетонам и растворам. Киев: Будивельник, 1979.
51. Шалимо М. А. Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий. Минск: Вышэйшая школа, 1987.
52. Шалимо М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Минск: Вышэйшая школа, 1987.
53. Шейкин А. Е., Чеховский К. И., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979.
54. Шейкин А. Е. Строительные материалы. М.: Стройиздат, 1978.
55. Яковлев Г. И., Тюрин А. П., Фортуненко Ю. А. Портовые гидротехнические сооружения. М.: Транспорт, 1990.
56. Ярмоленко Н. Г., Искра Л. И. Справочник по гидроизоляционным материалам для строительства. Киев: Будивельник, 1984.
57. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика стройиздат, 1983.
58. Бетонные плотины (на скальных основаниях).
59. Чугаев Р. Р. Гидротехнические сооружения; Высшая школа: М, 1975, 328 с.
60. Рекомендации по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты, Стройиздат, М, 1976.
61. Руководство по проектированию плотин из грунтовых материалов, возводимых в северной строительной-климатической зоне, ВНИИГ. Л. 1976, 65 с.
62. Руководство по контролю качества возведения плотин из грунтовых материалов. ВНИИГ. Л. 1976, 219 с.
63. Байков В. Н., Стронгин С. Г. Строительные конструкции: М: Стройиздат, 1980, 364 т.
64. Бирюлев В. В. и др. Проектирование металлических конструкций. Л.: Стройиздат, 1990. 432 ст.
65. Баянов Г. Ф. Плотины на вечной мерзлоте. Энергия. М. 1975. 1Х4 с.
66. Саяно-Шушенская ГЭС издательство «Сибирь». Красноярск, 1978. 20 с.
67. Васильев А. А. «Металлические конструкции». М. Стройиздат, 1968. 394 с.
68. Толкачев Л. Н., Судаков В. Б. Токтогульский метод бетонирования массивных сооружений, издательство «Энергия». Москва, 1973, 158 с.
69. Непорожный П. С. Из опыта строительства приплотинной гидроэлектростанции. М. Госэнергоиздат, 1954, 97 с.
70. Успенский В. П. Опыт организации бетонных работ на гидротехническом строительстве, Госстройиздат .Л. 1960, 146 ст.
71. Куперман В. Л., Мызников К. Н., Торопов Л. Н. Гидроэнергетическое строительство на Севере, М, Энергоатомиздат, 1987. 304 т.
72. Ерахтин Б. М. Опыт строительства гидроузлов. М. Энергоатомиздат, 1987. 288 с.
73. Рекомендации по проектированию и устройству асфальтобетонных противофильтрационных элементов в грунтовых гидротехнических сооружениях. Л.ВНИИГ, 132 с.
74. Горчаков Г. И., Баженов Ю. М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986.
75. Микульский В. Г., Горчаков Г. И., Козлов В. В., Куприянов В. Н., Орендлихер Л. П., Рахимов Р. З., Сахаров Г. П., Хрулев В. М. Строительные материалы / под ред. В. Г. Микульского. – М.: АСВ, 1996, 2000.

76. Рыбьев И. А., Арефьева Т. Н., Баскаков Н. С., Казенова Е. П., Коровников Б. Д., Рыбьева Т. Г. Общий курс строительных материалов / под ред. И. А. Рыбьева. М.: Высшая школа, 1987.
77. Хигерович М. И., Горчаков Г. И., Рыбьев И. А., Домокеев А. Г., Ерофеева Е. А., Оrentлихер Л. П., Попов Л. Н., Попов К. Н. Строительные материалы / под ред. Г. И. Горчакова. – М.: Высшая школа, 1982.
78. Эвальд В. В. Строительные материалы, их изготовление, свойства и испытания. – С.-Пб. – Л. – М: 1896–1933, 14-е изд.
79. Композиционные материалы волокнистого строения. К., 1970.
80. Конкин А. А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы, М., 1974.
81. Композиционные материалы, пер. с англ., т. 1–8, М., 1978.
82. Наполнители для полимерных композиционных материалов, пер. с англ., М., 1981.
83. Сайфулин Р. С., Неорганические композиционные материалы, М., 1983.
84. Справочник по композиционным материалам, под ред. Д. Любина, пер. с англ., кн. I 2, М., 1988.
85. ГОСТ 31938–2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия». 2014 г.
86. Распоряжение Правительства РФ от 24 июля 2013 г. № 1307-р О плане мероприятий («дорожная карта») «Развитие отрасли производства композитных материалов».
87. Основные направления развития композиционных термопластичных материалов, М., 1988
88. Информационно-аналитический и производственный журнал «Проектирование и строительство в Сибири» № 4 (75), 2013 г.
89. Технические условия. Автодорожное пролетное строение длиной 9,0 м. с железобетонной плитой и многораскосными фермами из композиционных материалов. ТУ 5264–545–39124899–2013. 2013 г.
90. Технические условия. Автодорожное пролетное строение длиной 18,0 м. с железобетонной плитой и многораскосными фермами из композиционных материалов. ТУ 5264–546–39124899–2013. 2013 г.
91. Селяев В. П. Функционально-градиентные композиционные материалы и конструкции / В. А. Карташов, А. Л. Лазарев; издательство Мордовского университета, 2005 г., 160 с.
92. Concrete technology for a sustainable development in the 21st century. Ed. by O. E. GjOrv, K. Sakai. London – New York: E&FNSpon, 2000, 386 p.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. СОСТАВ, СТРУКТУРА, ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	6
1.1. Механические свойства	6
1.1.1. Деформационные свойства	6
1.1.2. Прочностные свойства	13
1.1.3. Влияние строения материала на его прочность.....	14
1.1.4. Реологические модели.....	17
1.2. Физические свойства	22
1.2.1. Параметры состояния.....	22
1.2.2. Структурные характеристики	25
1.2.3. Гидрофизические свойства	28
1.2.4. Теплофизические свойства	34
1.2.5. Электрофизические свойства.....	36
1.2.6. Радиационная стойкость	37
1.3. Химические свойства	42
1.4. Структура материалов	43
1.5. Оценка качества строительных материалов для гидротехнического строительства	43
1.6. Долговечность и надёжность.....	44
2. ГРУНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	45
2.1. Общие сведения.....	45
2.2. Классификация плотин из грунтовых материалов.....	47
2.3. Материалы для противофильтрационных элементов	49
2.4. Грунты для земляных насыпных плотин.....	50
2.5. Материал для земляных намывных плотин.....	51
2.6. Грунты для каменно-земляных и каменнонабросных плотин	53
2.7. Основные требования к материалам.....	56
2.8. Материалы для строительства грунтовых плотин на вечной мерзлоте	60
2.8.1. Общие сведения.....	61
2.8.2. Материалы, применяемые для строительства плотин	62
2.8.2.1. Земляные насыпные плотины	62
2.8.2.2. Каменно-земляные и каменнонабросные плотины.....	64
2.8.3. Основные требования к материалам.....	65
2.8.4. Мёрзлые плотины	67
2.8.5. Требования к конструкциям плотин мёрзлого типа.....	69
2.8.5.1. Борьба с пучением и морозобойным трещинообразованием	71
3. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА	73
3.1. Классификация и характеристика минеральных вяжущих веществ.....	73
3.2. Известь воздушная	74
3.3. Гипс.....	76
3.4. Портландцемент	77
3.5. Свойства портландцемента и его применение	79
3.5.1. Твердение портландцемента.....	79
3.5.2. Строительно-технические свойства портландцемента.....	80
3.5.3. Коррозия цементного камня	82

3.6. Специальные портландцементы.....	84
3.6.1. Пуццолановые цементы.....	88
3.7. Развитие производства сухих строительных смесей и растворов в России, СНГ и за рубежом	93
3.8. Общие сведения о технологии производства сухих смесей и растворов	94
3.8.1. Виды сухих смесей и растворов	94
3.8.2. Требования, предъявляемые к сухим смесям.....	95
3.8.3. Способы производства	97
3.8.4. Область применения.....	98
3.9. Сухие смеси в строительном производстве (рецепты)	100
3.9.1. Отделочные материалы	100
3.10. Строительно-технические свойства портландцемента.....	101
3.11. Строительно-технические свойства известковых, гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ ...	107
3.12. Влияние функциональных добавок на свойства ССС.....	120
3.13. Определение свойств строительных смесей	133
3.14. Определение качества минеральных компонентов сухих строительных смесей.....	135
3.15. Контроль качества цементов и других вяжущих веществ.....	135
3.16. Влажность ССС	136
3.17. Контроль качества гидратной извести	139
3.18. Определение качества заполнителей и наполнителей	140
4. ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ И РАСТВОРЫ.....	142
4.1. Основные технические требования и классификация.....	142
4.2. Кто изобрел бетон. История строительства.....	144
4.3. Основные сведения о бетоне	147
4.4. Прозрачный бетон – материал будущего	147
4.5. Бетоны и растворы. Определение и общая классификация бетонов и растворов	149
4.5.1. Бетон лёгкий.....	152
4.5.1.1. Конструкционные легкие бетоны в современном строительстве	153
4.5.1.2. Сборный конструкционный лёгкий бетон, в том числе перенапряжённый	154
4.5.1.3. Монолитный конструкционный лёгкий бетон	154
4.5.2. Материалы гидротехнического бетона	162
4.5.2.1. Мелкий заполнитель.....	162
4.5.2.2. Крупный заполнитель	164
4.5.2.3. Проектирование состава гидротехнического бетона.....	166
4.6. Расчетно-экспериментальный метод подбора	169
4.7. Расчет состав бетона по заданной водонепроницаемости	171
4.8. Структура бетона, твердение и прочность.....	174
4.8.1. Прочность бетона	176
4.8.2. Определение прочности бетона в изделиях и конструкциях.....	178
4.9. Стойкость бетона к действию климатических эксплуатационных факторов.....	180
5. СБОРНЫЕ БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ	183
5.1. Основные сведения о железобетоне	183
5.2. Материалы для сборного железобетона.....	184
5.2.1. Заполнители	184
5.2.2. Цемент и добавки	184
5.3. Применение сухих смесей в строительстве.....	184
5.4. Виды сухих смесей и растворов	185
5.5. Минеральные компоненты сухих строительных смесей.....	187

5.6. Модификация сухих строительных смесей полимерными добавками	192
5.7. Минеральные штукатурки и системы полной теплоизоляции.....	194
5.8. Гипсосодержащие строительные смеси.....	194
5.9. Факторы, влияющие на структуру и прочность материалов из сухих строительных смесей.....	195
5.10. Особенности технологии приготовления бетонной смеси для конструкций гидротехнических сооружений.....	198
5.10.1. Бетонные смеси для монолитного бетона	198
5.10.2. Приготовление бетонной смеси.....	200
5.10.3. Раздельное бетонирование.....	200
5.10.3.1. Способ восходящего раствора	200
5.10.3.2. Способ нисходящего раствора	202
5.10.3.3. Способ погружения крупного заполнителя в раствор.....	203
5.10.3.4. Способы ТНИСГЭИ.....	204
5.10.4. Транспортирование и укладка бетонной смеси	204
5.10.4.1. Транспортирование бетона автосамосвалами.....	204
5.10.4.2. Транспортирование бетона кранами.....	204
5.10.4.3. Транспортирование бетонной смеси мотовозами и виброхоботами.....	206
5.10.4.4. Транспортирование бетонной смеси насосами.....	206
5.10.5. Укладка бетонной смеси в блоки бетонирования	207
5.10.5.1. Подготовка блоков к бетонированию	207
5.10.5.2. Распределение бетонной смеси по блоку бетонирования.....	207
5.10.5.3. Уплотнение бетонной смеси в блоках бетонирования	208
5.10.6. Технология непрерывного бетонирования.....	209
5.10.7. Зимнее бетонирование	209
5.11. Зола – Унос и её применение в бетонах	210
5.11.1. Характеристика состава зол и классификация	210
5.11.2. Строительно-технические свойства зол ТЭС.....	218
5.11.3. Общие требования к золам.....	218
5.11.4. Применение зол в производстве тяжелых бетонов.....	220
5.11.4.1. Применение зол в смешанных вяжущих.....	220
5.11.4.2. Использование зол в качестве гранулометрической добавки	221
5.11.4.3. Строительные растворы с добавкой золы	222
6. ДРЕВЕСНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	223
6.1. Строение древесины.....	223
6.2. Основные породы древесины	224
6.3. Физические и механические свойства древесины.....	225
6.3.1. Химический состав древесины.....	225
6.3.2. Физические свойства древесины.....	225
6.3.3. Плотность древесины	226
6.3.4. Теплопроводность и теплоемкость древесины	227
6.3.5. Механические свойства древесины.....	227
6.4. Пороки древесины	229
6.5. Лесоматериалы и изделия для гидротехнического строительства	230
6.5.1. Виды лесных материалов	230
6.6. Долговечность древесины и ее повышение	231
7. КРОВЕЛЬНЫЕ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	233
7.1. Технология производства рубероида.....	233

7.2. Мастики.....	235
7.3. Гидроизоляционные асфальтовые мастики	235
7.4. Асфальтобетоны	235
7.5. Пример подбора состава асфальтобетона.....	236
8. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	239
8.1. Строение и свойства теплоизоляционных материалов	239
8.2. Органические теплоизоляционные материалы и изделия	240
9. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНА В ГТС.....	241
9.1. Плёночные	241
9.2. Геотекстиль в гидротехническом строительстве	242
10. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	245
10.1. Общие сведения	245
10.2. Основные компоненты красочного состава.....	245
11. МЕТАЛЛЫ И МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЯ.....	247
11.1. Структура и свойства металлов	247
11.2. Термическая и механическая обработка металлов	248
11.3. Арматурные стали	248
11.4. Строительные металлоизделия.....	249
11.5. Сварка и резка металлов	249
11.5.1. Виды сварки и их характеристика.....	249
11.6. Коррозия металлов.....	250
11.7. Влияние отрицательных температур на свойства стали.....	251
12. КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	252
12.1. Общие сведения о композиционных материалах.....	252
12.2. Состав и строение композита.....	252
12.3. Оценка матрицы и упрочнителя в формировании свойств композита	255
12.3.1. Композиционные материалы с металлической матрицей	255
12.3.2. Композиционные материалы с неметаллической матрицей	255
12.4. Строительные материалы – композиты.....	256
12.4.1. Полимеры в строительстве.....	256
12.4.2. Композиты и бетон.....	258
12.4.3. Алюминиевые композитные панели.....	259
12.5. Производство и использование композиционных материалов в строительстве – новый этап качества	261
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	274

В. И. Белан
А. С. Денисов

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

под редакцией д-р техн. наук, профессора В. И. Белана

Компьютерная верстка и оформление *Т. А. Измайлова*

Подписано в печать 24 апреля 2017 г. Формат $60 \times 84 \frac{1}{8}$.
Объем 14,1 уч.-изд. л., 35,25 усл. печ. л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1795.

Отпечатано в Издательском центре НГАУ «Золотой колос»
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.
Тел. (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru