

ВВЕДЕНИЕ

Минеральными вяжущими веществами называют порошкообразные материалы, образующие при смешивании с водой вязкопластичное тесто, которое с течением времени под влиянием физико-химических процессов переходит в камневидное состояние. Это свойство вяжущих используется для получения искусственных каменных материалов (растворов, бетонов и др.).

Вяжущие материалы бывают минеральными (неорганическими) и органическими. К минеральным вяжущим относятся: гипсовые, известковые, магнезиальные, цементы, вяжущие гидротермального твердения. К органическим – смолы и битумы. Это продукты перегонки нефти и каменного угля, называемые часто «черными вяжущими». В строительстве в основном используют минеральные вяжущие вещества.

Почти все минеральные вяжущие вещества получают путем грубого и тонкого измельчения исходных материалов и полупродуктов с последующей термической обработкой при различных температурах. В этих условиях протекают разнообразные физико-химические процессы, обеспечивающие получение продукта с требуемыми свойствами. Обожженный материал подвергают тонкому измельчению.

Для минеральных вяжущих характерны следующие признаки:

- 1) гидрофильность (иначе смешивание с водой было бы невозможным);
- 2) способность образовывать с водой тестообразную легко формующуюся массу (вяжущее тесто);
- 3) способность переходить из тестообразного состояния в твердое.

Вяжущее тесто получают при смешивании порошка вяжущего с водой. Если воды недостаточно, то смесь будет рыхлой, рассыпчатой; избыток воды приведет к получению растекающейся массы, работать с которой также затруднительно. Количество воды, которое необходимо для придания водовяжущей системе нужной подвижности, называется водопотребностью, или *нормальной густотой*.

Способность вяжущего вещества давать в смеси с водой пластичную массу является весьма ценным свойством. Это свойство сообщает строительным растворам удобообрабатываемость, позволяющую заполнить все детали формы или опалубки и придать еще не схватившейся массе ровную поверхность.

Твердение вяжущего вещества, т.е. превращение вяжущего теста в камневидное тело происходит в результате химических и физико-

химических процессов, специфичных для каждого вяжущего. Большинство минеральных вяжущих твердеет в результате возникновения гидратных новообразований при взаимодействии вяжущего вещества с водой. Лишь твердение гашеной извести происходит в итоге ее взаимодействия с углекислотой воздуха. Однако существует общая схема механизма гидратационного твердения вяжущих. В технологии строительных материалов принято различать два периода в процессе твердения вяжущего вещества: *схватывание* и собственно *твердение*.

Процесс схватывания выражается в том, что пластичная масса, обладающая большой подвижностью, начинает густеть и уплотняться, что отвечает *началу схватывания*. В дальнейшем эта масса все больше уплотняется, окончательно теряет пластичность и постепенно превращается в твердое тело, не обладающее сначала существенной прочностью. Этот момент соответствует *концу схватывания*. После этого происходят дальнейшие химические и физические преобразования, сопровождающиеся нарастанием прочности. Последнее характеризует собой *твердение вяжущих веществ*. Схватывание рассматривают как начальную стадию процесса твердения, при которой происходит превращение пластичной массы в твердое тело.

Если до начала схватывания смесь вяжущего вещества с водой называется *вяжущим тестом*, а при введении заполнителей – *бетонной смесью*, то по окончании схватывания применяются соответствующие названия: *камень* (например, цементный камень) и *бетон*. Знание сроков схватывания нужно для того, чтобы своевременно производить операции перемешивания, укладки и уплотнения бетонных (растворных) смесей, ибо по окончании схватывания тесто теряет свою пластичность [1].

Переходя из вязкопластичного состояния в камневидное, вяжущие вещества могут скреплять между собой камни (например, кирпич) или зерна песка, гравия и щебня. Начало использования человечеством вяжущих открыло новую эпоху в строительстве: вместо обтесывания камней строители с помощью вяжущих и камней произвольной формы могли делать любые конструкции, не беспокоясь о плотном прилегании одного камня к другому.

Прочность вяжущих изменяется во времени, поэтому оценивают вяжущие по прочности, набранной за определенное время твердения в условиях, установленных стандартом. Этот показатель принимают за *марку вяжущего*.

Минеральные вяжущие вещества используют в подавляющем большинстве случаев в смеси с водой и с так называемыми заполнителями – минеральными (а иногда и органическими) материалами, состоящими из отдельных зерен, кусков, волокон различных размеров. Вяжущие в смеси с мелким заполнителем (песком) дают *растворы*, а в смеси с мелким и крупным заполнителями (щебнем, гравием) – *бетоны*. Иногда вяжущее применяют только в виде смесей с водой без заполнителей (строительный гипс).

Использование вяжущего в смеси с заполнителями обусловлено двумя основными причинами. Первая причина экономического характера – стоимость вяжущих относительно высока, поэтому для снижения стоимости изделий или конструкций их необходимо изготавливать с минимальным расходом вяжущего. Для каждого вида изделий расход вяжущего определяется рядом требований, предусматривающих необходимую строительную прочность, надежность и долговечность того или иного сооружения. Вторая причина технического характера – вяжущие вещества в виде теста без заполнителей обнаруживают повышенную склонность к усадке и набуханию как при твердении, так и под влиянием тепловлажностных изменений. Это зачастую приводит к образованию трещин и ускоренному разрушению конструкций и сооружений.

Вяжущие вещества – основа современного строительства. Их широко применяют для изготовления штукатурных и кладочных растворов, разнообразных бетонов (тяжелых и легких), всевозможных искусственных строительных конгломератов (асбестоцементные, силикатные изделия и т.п.). Из бетонов на вяжущих веществах изготавливают различные строительные изделия и конструкции, в том числе и армированные сталью (железобетонные, армосиликатные и др.). Из бетонов возводят отдельные части зданий и целые сооружения (мосты, путепроводы, плотины и т.п.). В современном жилищном строительстве на 1 м² жилой площади в среднем расходуется около 300 кг вяжущих веществ [2].

1. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из первых вяжущих, которым пользовался человек, была необожженная глина. Этот материал применяется и до сих пор для возведения простейших сооружений, когда от изделий и конструкций не требуется высокой прочности. Вследствие слабых вяжущих

свойств, а главное, вследствие малой стойкости во влажных условиях необожженная глина со временем перестала соответствовать возросшим требованиям строительной техники. Позднее были найдены искусственные способы изготовления вяжущих веществ, получаемых обжигом соответствующих горных пород.

Вяжущие вещества, получаемые путем обжига, появились примерно за 4...3 тыс. лет до н.э. Первым из них был, по-видимому, строительный гипс, получаемый обжигом гипсового камня при сравнительно невысокой температуре – 110...190°C. Пять тысяч лет назад в Египте гипс широко применяли для кладочных и штукатурных растворов при строительстве пирамид, например, при возведении пирамиды Хеопса (рис. 1). Это величественное сооружение высотой более 140 м и со стороной квадратного основания 233 м. Рядом с пирамидой покоится Большой сфинкс (рис. 2) – гигантская скульптура фараона с туловищем льва, закрепленная на основании с помощью гипсового раствора. Гипсовая штукатурка получила распространение при строительстве домов и храмов. Вслед за гипсом появилась воздушная известь, изготавливаемая путем обжига известняка при более высокой температуре. При возведении пирамид и других монументальных сооружений египтяне применяли наряду с гипсом растворы из смеси гипса и извести. При сооружении некоторых пирамид использовался известковый раствор. В Китае при возведении ряда участков Великой Китайской стены (рис. 3) применяли известь еще за 200 лет до н.э. [3].



Рис. 1. Пирамида Хеопса



Рис. 2. Большой сфинкс



Рис. 3. Великая Китайская стена



Рис. 4. Колизей

Впервые известь стала использоваться сравнительно широко в Греции, прежде всего для штукатурных и облицовочных работ и в качестве грунта для стенной росписи. Римляне, переняв у греков прекрасную архитектуру, развили строительное искусство и начали массовое применение извести для кладочных растворов. Римские архитекторы оставили после себя не только памятники своего гениального труда, но и трактаты, где говорилось о технологии изготовления известковых растворов. К одному из самых значимых изобретений Древнего Рима относится создание искусственного каменного конгломерата – *бетона* на основе строительной воздушной извести. сводами из такого бетона перекрывались термы, акведуки, мосты.

Заметное применение бетона на территории древнеримского государства началось примерно с конца IV в. до н.э. и продолжалось около 700 лет. Сами римляне не были изобретателями бетона. Его технологию они переняли у этрусков, греков и других народов. Однако массовое применение бетон получил именно в Древнем Риме. Только римляне сумели полностью использовать такие его свойства, как прочность, водонепроницаемость и экономичность, а с I в. н.э. бетон превратился в один из основных конструкционных материалов [4].

Однако в начале новой эры римлян не удовлетворяли известные в то время воздушные вяжущие вещества, какими являлись строительный гипс и известь. Развивающееся городское хозяйство и дорожное строительство требовали водостойких вяжущих веществ с более высокой прочностью. Поэтому римляне строили водоводы, каналы и аналогичные сооружения на известковых растворах, к которым примешивали толченый бой кирпича или гончарных изделий, а также измельченную пуццолану. В Италии, стране с большим числом действующих и потухших вулканов, имелись огромные запасы трасов,

туфов и других продуктов вулканических извержений, известных под общим названием «пуццоланы», по месту их залежей вблизи итальянского города Поццуолли. Эти добавки придавали гидравлические свойства известковым растворам. Подобные растворы употреблялись преимущественно в строительстве гидротехнических сооружений.

Во время правления римского императора Августа начался расцвет бетонного производства. В этот период в Риме возводятся ряд крупных общественных зданий. Грандиозное строительство было неотъемлемой частью политической программы новой монархии. Рим, как столица и центр империи должен был быть хорошо украшен. Кроме того, он должен был вместить огромные массы людей. В I в. н.э. население Рима составляло более 1 млн. человек. Для такого огромного города необходим был целый ряд мер по благоустройству, проведению водопроводов, дорог, жилых и общественных зданий. Это требовало, с одной стороны, достаточно высокого уровня практических и теоретических строительных знаний, а с другой – прочного и долговечного материала. Всем этим требованиям лучше всего отвечал бетон.

В 90-х годах I в. н.э. был открыт Колизей (рис. 4), построены термы и триумфальная арка, где мощный пятиметровый фундамент был выполнен из трамбованного бетона. К концу I в. бетон занял в строительстве лидирующее положение среди основных конструкционных материалов, вытеснив дерево и природный камень. Его лидерство продолжалось вплоть до IV в. н.э. Наиболее выдающиеся сооружения этого периода – термы Диоклетиана, базилика Максенция (рис. 5) и трехпролетная арка Константина (рис. 6).



Рис. 5. Термы Диоклетиана (слева) и базилика Максенция и Константина (справа)

Долговечность римского бетона поразительна. Можно лишь удивляться, глядя на отдельные древнеримские здания и сооружения, простоявшие почти две тысячи лет.

Воздушная известь в сочетании с пуццоланом и другими гидравлическими добавками была практически единственным гидравлическим вяжущим веществом того времени, поскольку гидравлическая известь и романцемент применялись эпизодически и в ограниченном количестве. В применении гидравлической добавки к воздушной извести заключен один из главных секретов долговечности римского бетона [5].

В последующий период, с распадом Римской империи строительство из бетона практически прекратилось, были забыты способы его приготовления и укладки. Унаследованный от древних римлян рецепт смеси извести с гидравлическими добавками оставался основным почти до конца XVIII в. Однако гипс и известь имели недостаточную водостойкость. Развитие мореплавания XVII–XVIII вв. потребовало для строительства портовых сооружений создания новых материалов, устойчивых к действию воды.

В 1756 г. англичанин Д. Смит применил при строительстве Эдистонского маяка (рис. 7) продукт, полученный обжигом известняка, содержащего глинистые примеси. Это вяжущее обладало гидравлическими свойствами и поэтому впоследствии было названо *гидравлической известью*.



Рис. 6. Трехпролетная арка Константина



Рис. 7. Эдистонский маяк

В 1796 г. англичанин Д. Паркер предъявил патент на производство из мергеля негасящегося вяжущего материала, требующего после обжига помола и твердеющего под водой. Этот продукт напоминал

цветом древние римские смеси из извести и пуццоланы и поэтому был назван *романцементом* (римским цементом).

В наше время гидравлическая известь и романцемент утратили практическое значение, но до второй половины XIX в. они были основными вяжущими материалами, используемыми при строительстве гидротехнических сооружений.

На Руси вяжущие материалы стали применять в X – XI вв. при возведении городских стен, башен, церквей и т.п. Развитие производства вяжущих материалов было вызвано строительством древних русских городов – Киева, Новгорода, Пскова, Ростова, Суздаля, Владимира, Москвы и др.

В 1584 г. в Москве был учрежден Каменный приказ, который наряду с заготовкой строительного камня и выпуском кирпича ведал также изготовлением извести. Организация Каменного приказа послужила дальнейшим толчком в развитии ее производства.

Уже в конце XVII – начале XVIII вв. в России наряду с белой (воздушной) известью, используемой в основном для штукатурных работ при кладке фундаментов, стен, сводов и других сооружений, начали широко применять серую (гидравлическую) известь [6].

В XVIII в. в России систематизируется накопленный опыт производства и применения вяжущих веществ, плодотворно разрабатываются научные и практические проблемы. Это было связано с общим ростом русской промышленности и культуры: было построено свыше трех тысяч промышленных предприятий, не считая горных заводов, в 1725 г. была основана Академия наук.

В связи с большим промышленным, военным и гражданским строительством потребовались более эффективные, чем известь и гипс вещества. Во второй половине XVIII в. в России разрабатываются и осваиваются способы изготовления вяжущих из мергелей и искусственных смесей, по составу подобных мергелям.

После отечественной войны 1812 г. в Москве развернулись большие строительные работы, прежде всего по восстановлению разрушенного Наполеоном Кремля. Необходимо было строить каменные здания взамен многочисленных деревянных строений, уничтоженных пожаром. Для этого требовалось значительное количество вяжущих материалов высокого качества.

Е. Челиев, начальник Московской военно-рабочей бригады мастерских команд, производивших строительные работы в Москве, обобщил накопленный русскими строителями опыт и описал способ производства гидравлического вяжущего в книге «Полное наставление, как приготавливать дешевый и лучший мертель (цемент),

весьма прочный для подводных строений, как-то: каналов, мостов, бассейнов, плотин, подвалов, погребов и штукатурки каменных и деревянных строений».

В этой книге Е. Челиев описывает производство вяжущего вещества из искусственной сырьевой смеси, состоящей из одной части извести, обожженной из известняка, и одной части глины. Эти материалы смешивали друг с другом в присутствии воды и формовали в кирпичи, которые обжигались в горне на сухих дровах до белого каления (приблизительно при температурах 1100...1200°C). Продукт обжига Челиев предлагал измельчать на жерновах и просеивать через решета и грохоты, а затем упаковывать в бочки. Он считал необходимым брать гашеную известь, а не молотый известняк, так как последний нельзя было помолоть на существовавших в то время аппаратах до такой тонкости, которую имела гашеная известь. Уже тогда Челиев предлагал добавлять гипс к получаемому им цементу для повышения прочности и атмосферостойчивости.

В 1824 г. англичанином Д. Аспдином был заявлен патент на производство вяжущего вещества, названного им портландцементом, так как оно в затвердевшем виде по цвету и прочности сильно походило на «портландский камень», добываемый вблизи г. Портленда. Получали портландцемент путем обжига искусственной смеси известняка с глиной до полного удаления углекислоты при температуре 900...1000°C и последующего измельчения обожженного материала в порошок. Хотя название «портландцемент» и сохранилось, однако полученный Аспдином цемент не был портландцементом в современном смысле этого слова, а представлял собой разновидность романцемента вследствие недостаточной температуры обжига (не доведенной до спекания).

Д. Аспдин не указал в своем патенте массовое соотношение компонентов, а обжиг велся лишь до полного удаления углекислого газа, т.е. до более низкой температуры, чем рекомендовал Е. Челиев. Качество цемента Д. Аспдина было хуже, чем цемента Е. Челиева, поскольку наиболее гидравлически активные спекшиеся куски он рекомендовал выбрасывать. Е. Челиев, понимавший значение обжига смеси исходных компонентов «добела», описал уже применявшийся способ изготовления гидравлического вяжущего, который был более совершенным, чем способ Д. Аспдина. Таким образом, основоположником производства портландцемента в нашей стране является Е. Челиев.

В 1836 г. в Англии была издана первая книга о бетоне, а в 1865 г. выдан первый патент на способ возведения бетонных сооружений в

деревянной опалубке. В 1867 г. французом Ж. Монье (рис. 8) был запатентован железобетон. Появление бетона и железобетона усилило значение цемента как основного строительного вяжущего вещества [7].

Немецкий ученый В. Михаэлис в 1880 г. предложил способ изготовления силикатного кирпича из извести и песка с применением автоклавной обработки. Россия в конце XIX в. одной из первых стран освоила массовый выпуск силикатного кирпича. В эти же годы расширилось и производство портландцемента.

Работы русских ученых создали предпосылки в организации предприятий по производству вяжущих материалов в различных районах России. Заводское производство романцемента в России было организовано в Петербурге в 1839 г., затем были построены заводы в Усть-Ижоре в 1848 г., в Подольске в 1849 г. и в ряде других мест. Первый завод по производству товарного портландцемента был построен в 1856 г. в г. Гроздеце Петроковской губернии. Затем были пущены в эксплуатацию заводы в Риге, Щурове, Подольске, Новороссийске, Брянске и других городах.

В XIX и начале XX вв. русские ученые во главе с Д. И. Менделеевым продолжили изучение вяжущих веществ. Их работы оказали большое влияние на развитие отечественной и зарубежной науки, способствовали развитию цементной промышленности. К 1910 г. в России работало 30 полумеханизированных заводов по производству портландцемента общей мощностью около 1 млн т цемента в год, а в 1913 г. его производство достигло 1,78 млн т.

Со второй половины XIX в. портландцемент прочно вошел в строительную практику. В России над его созданием и совершенствованием работал А. Р. Шуляченко (рис. 9), которого называли отцом русского цементного производства. Его заслуга состоит в том, что высококачественные отечественные портландцементы почти полностью вытеснили из России цементы иностранного производства.

Большой вклад в научные разработки по получению минеральных вяжущих веществ внесли Н. А. Белелюбский (рис. 10), Н. Н. Лямин, С. А. Дружинин. В 1881 г. А. Р. Шуляченко и И. Г. Малюга создают новые русские нормы на цемент. Ряд методов испытания цемента, предложенных Н. А. Белелюбским, вошли в мировую практику. В 1866 г. в России впервые применили пуццолановый цемент.



Рис. 8. Ж. Монье
(1823–1906)



Рис. 9. А. Р. Шуляченко
(1841–1903)



Рис. 10. Н. А. Белелобский
(1845–1922)

С развитием цементной промышленности возросло производство бетона и железобетона. Появились также другие искусственные каменные материалы на основе вяжущих – асбестоцемент, шлаковые блоки. Начало развиваться производство силикатных изделий на основе кварцевого песка и извести.

В 1908 г. француз Бид и американец Шпекман независимо друг от друга создали быстротвердеющий глиноземистый цемент. Этот цемент впервые в мировой практике был применен французами в начале Первой мировой войны, и до 1916 г. Франция оставалась его единственным производителем.

В СССР первые работы по получению глиноземистого цемента и изучению его свойств были выполнены группой советских ученых во главе с В. А. Киндом. Поскольку зарубежные фирмы держали способ получения глиноземистого цемента в секрете, советские исследователи разработали его заново и предложили ряд новых оригинальных научно-технических решений, как например, способ комплексного получения в доменной печи глиноземистого цемента и легированных чугунов, успешно осуществляющийся в нашей стране и поныне.

В годы Первой мировой войны и последующей гражданской войны производство цемента в нашей стране резко снизилось. Многие цементные заводы были разрушены и молодому Советскому государству пришлось практически заново создавать цементную промышленность, и уже в 1927 г. производство цемента превысило уровень 1913 г.

Развивающееся строительство предъявило ряд новых требований к вяжущим веществам. Так, для изготовления монолитных железобетонных конструкций оказался необходим особо

быстротвердеющий цемент; для возведения массивных сооружений требовались цементы с малым тепловыделением, так как большое количество теплоты, выделяющееся при твердении обычного портландцемента, приводит к значительным внутренним напряжениям в этих конструкциях; для бетонных дорог нужен был цемент, обладающий повышенной морозостойкостью, малой истираемостью и незначительной усадкой; для декоративных целей были необходимы белый и цветные цементы; для ряда специальных сооружений надо было применять расширяющийся цемент; для цементации нефтяных и газовых скважин – тампонажный цемент и т.д.

Для улучшения свойств цементов и изделий из них ученые предложили вводить небольшие количества добавок поверхностно-активных веществ. Так появились пластифицированный и гидрофобный цементы. С развитием металлургического производства цементная промышленность получила возможность использовать в больших количествах доменный шлак. Так появился шлакопортландцемент и другие шлаковые вяжущие вещества.

В последующие годы строилось много новых механизированных цементных заводов, снабженных более совершенным оборудованием; кроме того, было реконструировано большинство старых заводов, качество выпускаемого цемента значительно улучшилось. Расширился и ассортимент выпускаемой продукции. Впервые в мире в СССР начали выпускать такие разновидности цемента, как расширяющийся, напрягающий и гидрофобный. В послевоенные годы активно велись и сейчас ведутся интенсивные научные исследования по теории твердения портландцемента, модифицирования его свойств введением добавок поверхностно-активных веществ.

2. ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА: КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ, СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Вяжущие вещества классифицируют в зависимости от состава, основных свойств и областей применения. По способу твердения (набора прочности) вяжущие материалы различают на воздушные, гидравлические и гидротермального твердения.

Воздушные вяжущие вещества – после смешивания с водой твердеют и длительное время сохраняют свою прочность только на воздухе. Поэтому эти вяжущие вещества применяют лишь в надземных сооружениях, не подвергающихся действию воды.

Гидравлические вяжущие вещества – наиболее обширная группа вяжущих, которые, будучи затворены водой, способны твердеть как на

воздухе, так и в воде, причем в последнем случае они существенно наращивают свою прочность. В соответствии с этим гидравлические вяжущие вещества можно применять как в надземных, так и в подземных и гидротехнических сооружениях, подвергающихся воздействию воды.

Вяжущие гидротермального твердения – наиболее эффективно твердеют при гидротермальной (автоклавной) обработке в течение 6...10 ч при давлении насыщенного водяного пара 0,8...1,2 МПа.

2.1. Воздушные вяжущие вещества

В группу воздушных вяжущих веществ входят воздушная известь, гипсовые и магнезиальные вяжущие вещества. Воздушную известь изготавливают следующих видов: негашеная комовая, негашеная молотая и гидратная (пушонка). К гипсовым вяжущим относятся: строительный гипс, формовочный гипс, технический (высокопрочный) гипс, ангидритовое вяжущее, высокообжиговый гипс (эстрих-гипс). Магнезиальные вяжущие представляют каустический магнезит и каустический доломит.

2.1.1. Гипсовые вяжущие вещества

Гипсовыми вяжущими веществами называют материалы, состоящие из полуводного гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) или ангидрита (CaSO_4). Получение их основано на способности природного (двуводного) гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в процессе нагревания частично или полностью дегидратироваться.

Гипсовые вяжущие вещества являются воздушными вяжущими материалами, которые по условиям тепловой обработки, а также скорости схватывания и твердения делят на две группы: *низкообжиговые* и *высокообжиговые*. Низкообжиговые быстро схватываются и твердеют; состоят они из полуводного гипса, полученного тепловой обработкой гипсового камня при температурах 110...180°C. К ним относятся строительный гипс (алебастр), формовочный гипс и высокопрочный гипс. Высокообжиговые медленно схватываются и твердеют; состоят преимущественно из безводного сульфата кальция, полученного обжигом при температурах 600...900°C. К ним относятся ангидритовый цемент, высокообжиговый гипс (эстрих-гипс) и отделочный гипсовый цемент.

Гипсовые вяжущие наиболее эффективны в технико-экономическом отношении, особенно по удельным затратам сырья,

топлива, электроэнергии и труда на единицу продукта. Неограниченны и запасы исходного природного сырья, а также побочных гипсосодержащих материалов, образующихся на предприятиях химической промышленности.

2.1.1.1. Сырье для производства гипсовых вяжущих веществ

Сырьем для производства гипсовых вяжущих веществ служит природный гипс, реже – ангидрит, а также гипсосодержащие отходы химической промышленности – фосфогипс и борогипс. Основой производства гипсовых вяжущих материалов является тепловая обработка двухводного сульфата кальция (природного гипса), при которой происходит частичная дегидратация до полуводного состояния:



Процесс схватывания и твердения гипсового вяжущего заключается в том, что при смешивании с водой оно образует пластичную массу, превращающуюся впоследствии в твердое камневидное тело с определенной прочностью. Это превращение происходит не сразу, а постепенно и обуславливается рядом физико-химических процессов.

В процессе схватывания и твердения гипса полугидрат переходит в кристаллический двухводный гипс, как бы возвращая себе потерянные при обжиге полторы молекулы воды:



2.1.1.2. Свойства строительного гипса

Водопотребность. Для затворения строительного гипса и получения гипсового теста приходится брать воду в значительно большем количестве, чем это необходимо для химических реакций. Теоретически для гидратации полуводного гипса с образованием двухводного необходимо 18,6 % воды по массе вяжущего вещества. Практически же для получения теста нормальной густоты требуется 50...70 % воды. Избыточное количество воды, оставшееся в порах затвердевшего материала, в дальнейшем испаряется и вызывает характерную для гипсовых изделий пористость, которая составляет после высыхания 40...60 % и более от общего объема затвердевшего гипса. Чем меньше воды было взято для затворения, тем плотнее и прочнее получается гипсовое изделие.

Водопотребность гипса увеличивается с повышением степени его измельчения, но при этом возрастает и прочность затвердевшего изделия. Водопотребность гипса значительно снижается при введении с водой затворения замедлителей схватывания, что снижает нормальную плотность и способствует увеличению прочности гипсовых изделий.

Начало схватывания гипсового теста составляет 4...6 мин, конец – не позднее 30 мин с момента затворения водой. Быстрое схватывание гипсового теста является в большинстве случаев положительным его свойством, позволяющим быстро извлекать изделия из форм. Однако в ряде случаев быстрое схватывание нежелательно. Для замедления сроков схватывания используются уже упомянутые добавки – замедлители схватывания.

Прочность гипса определяется испытанием образцов-балочек размеров 4×4×16 см из теста стандартной консистенции (нормальной густоты). Балочки испытывают через 2 ч после изготовления на изгиб, а их половинки – на сжатие. Согласно ГОСТ 125–79 строительный гипс имеет следующие марки по прочности: Г-2, Г-3, Г-4, Г-5, Г-6, Г-7, Г-10, Г-13, Г-16, Г-19, Г-22, Г-25. Цифра означает величину прочности при сжатии в мегапаскалях. Гипсовые вяжущие высшей категории качества должны характеризоваться маркой не ниже Г-5.

Следует отметить, что прочность строительного гипса значительно меньше прочности цемента, но вполне достаточна для тех изделий, для которых гипс в основном применяется. Прочность изделий из строительного гипса снижается при введении в них заполнителей. Это одна из причин, по которой гипсовые изделия выпускают без заполнителей.

Плотность. Плотность строительного гипса обычно составляет 2500...2800 кг/м³. Однако плотность затвердевшего гипсового камня довольно низкая (1200...1500 кг/м³) из-за значительной пористости (60...30 % соответственно) [8, 9].

Деформативность. Строительный гипс при схватывании и твердении в первоначальный период обладает способностью увеличиваться в объеме примерно на 0,5...1 %. Такое увеличение объема еще не окончателно схватившейся гипсовой массы не имеет вредных последствий. Наоборот, в ряде случаев оно очень ценно (например, при изготовлении архитектурных деталей), так как при этом гипсовые отливки хорошо заполняют формы и точно передают их очертания. Расширение гипса уменьшается с увеличением содержания в тесте воды, а также при введении в него замедлителей схватывания.

Однако при последующем высыхании гипсовые изделия дают усадку, что сопровождается значительными напряжениями, вызывающими снижение прочности и даже появление трещин. Изделия из строительного гипса в затвердевшем состоянии проявляют пластические (остаточные) деформации, особенно при длительном действии изгибающих нагрузок (ползучесть). Эти деформации вызывают медленное необратимое изменение размеров и формы и усиливаются с повышением влажности гипса. Значительная склонность затвердевшего гипса к деформациям ползучести в сильной степени ограничивает возможности его применения в конструкциях, работающих на изгиб. Ползучесть гипсовых изделий значительно уменьшается при введении в гипсовое тесто порглицемента совместно с пуццолановыми (гидравлическими) добавками.

Долговечность. Изделия из строительного гипса характеризуются большой долговечностью при их эксплуатации в воздушно-сухой среде. При длительном воздействии воды, особенно при низких температурах, когда изделия подвергаются систематическому замораживанию и оттаиванию, они разрушаются. Гипсовые изделия обычно имеют морозостойкость 15...20 циклов.

Гипс является неводостойким материалом, его коэффициент размягчения составляет 0,3...0,45. Поэтому изделия из строительного гипса применяют внутри помещений в условиях низкой относительной влажности (не более 60...65 %). Однако водостойкость гипсовых изделий можно несколько повысить: применением интенсивных способов уплотнения гипсобетонных смесей при формовании; введением в гипсовое тесто небольшого количества синтетических смол, кремнийорганических соединений; нанесением покровных пленок или пропитыванием изделий растворами синтетических смол, гидрофобными веществами и т.п. Наиболее эффективным способом является применение смешанных вяжущих, представляющих собой композиции из строительного гипса, порглицемента или доменных гранулированных шлаков и пуццолановых добавок.

Гипсовые изделия огнестойки. Они прогреваются относительно медленно и разрушаются лишь после 6...8 ч нагрева, т.е. при такой продолжительности пожара, которая маловероятна. Поэтому гипсовые изделия часто рекомендуют в качестве огнезащитных покрытий.

Стальная арматура в гипсовых изделиях, особенно при значительной их пористости, подвергается интенсивной коррозии. Поэтому арматуру перед использованием в гипсовых изделиях покрывают обмазками: цементно-битумными, цементно-полистирольными и др.

Гипс хорошо сцепляется с древесиной, и поэтому его целесообразно армировать деревянными рейками, картоном или целлюлозными волокнами и наполнять древесными стружками и опилками. Это существенно повышает предел прочности при изгибе гипсовых изделий.

Эксплуатационная надежность и долговечность гипсовых материалов связаны, прежде всего, с их сравнительно высокими гигроскопичностью и водопоглощением. Предел прочности при сжатии их обычно составляет 3...4 МПа, но их насыщение водой в количестве 2...8 % приводит к резкому снижению прочности и разрушению. Однако в сухих условиях эксплуатации или при предохранении от действия воды (гидрофобизирующие покрытия, пропитки и т.п.) гипс очень перспективное, с технической и экологической точек зрения, вяжущее [8, 9].

Строительный гипс характеризуется быстрым твердением и имеет белый цвет. Он может применяться в чистом виде (без заполнителей), так как при его высыхании не образуется трещин.

2.1.1.3. Применение строительного гипса

Строительный гипс широко применяется для производства различных строительных изделий: панелей и плит для перегородок, листов для обшивки стен и перекрытий (гипсокартон), стеновых камней, архитектурно-декоративных изделий, вентиляционных коробов и т.д. Изделия из строительного гипса изготавливаются без заполнителей (гипсовые) или с применением их (гипсобетонные). В качестве заполнителей используются древесные опилки, доменные шлаки, кварцевый песок. Органические заполнители улучшают взводимость и уменьшают плотность изделий.

Применение заполнителей хотя и сокращает расход гипса, но уменьшает прочность изделий. Для повышения прочности гипсобетонных изделий уменьшают расход воды затворения, а при укладке смеси применяют вибрирование, прессование, трамбование.

Для армирования гипсовых изделий применяют деревянные рейки, картон, камыш, растительные волокна, стекловолокно, древесную фибру, измельченную бумажную массу и другие волокнистые материалы. Обычная стальная арматура без защитного поверхностного слоя (цементно-битумных, цементно-полистирольных и других обмазок) не может применяться в гипсовых изделиях, так как она подвергается коррозии вследствие слабого сцепления гипса с арматурной сталью.

Наиболее широкое применение в строительстве получили гипсокартонные и гипсоволокнистые листы, а также перегородочные плиты, блоки, панели.

Гипсокартонные листы – отделочный материал, состоящий из затвердевшего гипсового сердечника, прочно соединенного с картонной оболочкой, покрывающей все плоскости листов и их грани, кроме торцовых (рис. 11, *а*). В процессе производства в гипсовое тесто вводят пенообразующие добавки для снижения плотности, органические волокна с целью армирования гипсового камня и другие добавки. Изготавливают гипсокартонные листы методом непрерывного проката, причем твердеющий гипс прочно приклеивает к себе листы картона. Назначение картона – повысить прочность материала на изгиб и придать ему гладкую поверхность.

Гипсокартонные листы выпускают длиной 2,0...4,0 м, шириной 0,6...1,2 м, толщиной 6,5...24 мм, плотностью 850...950 кг/м³ (ГОСТ 6266–97). Их применяют для отделки внутренних поверхностей помещений – стен, потолков, перегородок. Использовать их можно только в помещениях с нормальной относительной влажностью воздуха (до 60 %), а в санузлах – лишь при условии надежной защиты от увлажнения. Такие листы целесообразнее прикреплять к основанию не гвоздями, а мастиками.



Рис. 11. Гипсокартонные листы (*а*) и пазогребневые гипсовые плиты (*б*)

Применение гипсокартона (сухой гипсовой штукатурки) упрощает и ускоряет отделочные работы, поскольку крепление листов к стенам и перегородкам – менее сложный процесс, чем оштукатуривание тех же поверхностей; кроме того, не нужно тратить время на сушку.

Гипсоволокнистые листы изготавливают из формовочной массы, состоящей из гипсового вяжущего, бумажной макулатуры и воды. Такие листы используют для устройства сборных стяжек при настилке полов. Гипсоволокнистые листы имеют повышенную прочность при

изгибе и звукоизолирующую способность, хорошую гвоздимось, легко обрабатываются. На основе гипсоволокнистых масс освоено производство перегородочных панелей и плит, подоконных досок и декоративных рельефных плит.

Гипсоволокнистые листы изготовляют без картона, что значительно снижает их стоимость и упрощает технологию производства по сравнению с гипсокартоном.

Лицевые поверхности гипсокартонных и гипсоволокнистых листов, как правило, отделяются полимерными пленками или текстурной бумагой под дерево или мрамор и покрываются прозрачными лаками. Такой материал носит название *декорт*.

Гипсовые плиты для перегородок изготовляют из гипса марок Г-4 и Г-5 методом литья. Большинство плиты имеют паз и гребень, что облегчает монтаж перегородок (рис. 11, б). Масса 1 м² перегородки 80...100 кг.

Выпускают два вида плит: обыкновенные и влагостойкие. Последние изготовляют, вводя в гипсовое тесто гидрофобные добавки. Водопоглощение по массе обычных плит менее 35 %, влагостойкость – менее 5 %.

Размеры перегородок из гипсовых плит: высота не более 3,6 м, длина не более 6 м. При больших размерах требуется установка разделительных укрепляющих элементов из металла и бетона, надежно соединенных с несущими конструкциями.

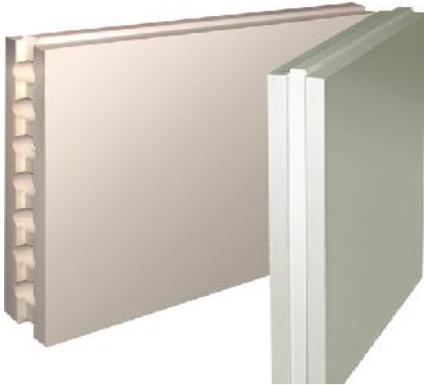


Рис. 12. Гипсобетонные панели

Гипсобетонные панели для перегородок применяются во всех типах жилых, общественных и промышленных зданий. Панели размером на комнату (высотой до 4 м, длиной до 6,6 м) могут быть с проемами для дверей и фрагм, сплошными и пустотелыми (рис. 12). Гипсобетонные панели для помещений с повышенной влажностью, например, санитарно-технические кабины, изготовляют на

гипсоцементно-пуццолановом вяжущем или гидрофобизированном гипсе. К гипсобетонным панелям предъявляются в основном требования по прочности и звукоизоляции.

Поскольку гипсовые панели и плиты достаточно огнестойки, их нередко применяют в качестве огнезащитной облицовки металлических и деревянных конструкций.

Гипсовые вентиляционные блоки изготовляют высотой «на этаж». Толщина блока 180...200 мм при диаметре вентиляционных каналов 140 мм, ширина зависит от числа вентиляционных каналов.

Из строительного гипса можно изготовлять ячеистые изделия (пено- и газогипс), представляющие собой теплоизоляционные строительные материалы с равномерно распределенными мелкими воздушными порами, образующимися вследствие введения в гипсовое тесто пено- или газообразующих веществ.

Гипсовые изделия обладают сравнительно небольшой плотностью, несгораемостью, звукоизолирующей способностью, гигиеничностью, декоративностью, низкой себестоимостью и рядом других ценных свойств. Они применяются в сборном строительстве, что позволяет индустриализировать процесс строительного производства. Недостатками гипсовых изделий являются низкая водостойкость, высокая хрупкость, а также ползучесть, т.е. пластические (остаточные) деформации под нагрузкой, увеличивающиеся со временем, особенно если изделие увлажняется, поэтому гипсовые изделия не рекомендуется применять в помещениях с повышенной влажностью.

Строительный гипс используется для изготовления известково-гипсовых штукатурных растворов для внутренних стен зданий. В известково-гипсовых растворах на 1 объемную часть гипса берут от 1 до 5 объемных частей известкового теста, которое замедляет схватывание, повышает пластичность раствора. С целью уменьшения расхода вяжущего и во избежание появления трещин при твердении известки к смеси прибавляют до трех объемных частей песка или другого заполнителя: шлака, пемзы, древесных опилок и т.п. Строительный гипс может применяться для штукатурки и без добавки известки, однако тогда необходимо вводить замедлители схватывания.

Эффективными строительными изделиями для развивающегося индивидуального строительства России являются мелкие стеновые блоки (или стеновые камни) на основе гипсовых или гипсо-цементно-пуццолановых вяжущих веществ. Они могут изготовляться сплошными или пустотелыми, плотной или ячеистой (газогипс, пеногипс) структуры. Прочность таких камней может быть от 1,5 до 10 МПа при плотности от 600 до 1500 кг/м³. Широкое применение строительный гипс получил при производстве декоративных и акустических гипсовых плит. Используются эти элементы для устройства подвесных потолков и внутренней облицовки стен.

Акустические плиты-экраны выпускают различных размеров с квадратными, прямоугольными или круглыми отверстиями (перфорация). Степень перфорации (отношение площади отверстий к общей площади всей поверхности плиты) таких плит составляет 20...30 % [10].

Гипс используется для изготовления архитектурных (лепнина) и скульптурных изделий. Гипсовая скульптура и резьба по гипсовому камню широко применяются в художественном оформлении интерьеров (рис. 13).



Рис. 13. Гипсовая скульптура (*слева*) и резьба по гипсовому камню (*справа*)

Лепнина также является одним из приемов оформления интерьеров и экстерьеров, который применяется в реставрации исторических зданий, а также в строительстве современных домов и коттеджей. Гипсовая лепнина – это не просто украшение интерьера объемными и рельефными элементами, а общий стиль помещения, которое, благодаря применению изделий из гипса, становится неповторимым и стильным (рис. 14).

Из гипса изготавливают искусственный мрамор, в состав которого кроме гипса входят мраморная мука и красители (пигменты); затворяют эту смесь клеевой водой. В состав смеси иногда вводят сульфат калия.



Рис. 14. Гипсовая лепнина: карниз (*слева*) и потолочная розетка (*справа*)

Из-за высокой пористости затвердевший гипс обладает малой теплопроводностью, поэтому он вместе с асбестом и другими материалами входит в состав теплоизоляционных композиций.

Формовочный гипс используется для отливки изделий сложных форм (методом шликерного литья) в фарфорофаянсовой и керамической промышленности, а технический (высокопрочный) гипс, получаемый термообработкой при повышенном давлении в автоклаве – для изготовления элементов стен и сборных перегородок, стеновых камней. Оба эти вида гипса могут также использоваться для изготовления архитектурных и скульптурных изделий.

Изделия на основе гипсовых вяжущих отличаются сравнительно небольшой плотностью, высокой тепло- и звукоизолирующей способностью, огнестойкостью, высокими технико-экономическими показателями. Доступность сырья, простота технологии и низкая энергоемкость производства (в 4...5 раз меньшая, чем для получения портландцемента) делают строительный гипс дешевым и перспективным вяжущим.

2.1.1.4. Высокообжиговые гипсовые вяжущие

Ангидритовый цемент. При обжиге природного гипса при температурах 600...700°C получается нерастворимый ангидрит, который медленно схватывается (начало схватывания наступает не ранее, чем через 30 мин, а конец – через 8 ч от начала затворения). Пористость затвердевшего ангидритового вяжущего меньше пористости строительного гипса и колеблется в пределах 30...35 %. Плотность ангидритового вяжущего 2800...2900 кг/м³.

Твердение ангидритового цемента, как и строительного гипса, обусловлено образованием двугидрата. При твердении ангидритовый

цемент в объеме не увеличивается. Гидравлическими свойствами он не обладает, однако он более водостоек, чем строительный гипс. После предварительного твердения во влажной среде ангидритовый цемент продолжает набирать прочность в воздушно-сухих условиях. При длительном хранении в воде его прочность снижается, а при последующем высыхании снова восстанавливается.

Строительные нормы и правила предусматривают марки ангидритового цемента по прочности 50, 100, 150 и 200 кгс/см². Строительные растворы на ангидритовом цементе выдерживают без видимого разрушения более 15 циклов замораживания-оттаивания.

Ангидритовый цемент может применяться для приготовления кладочных и штукатурных растворов, а также для бесшовных полов и подготовок под линолеум. Его используют для получения различных строительных деталей (полов, лестничных площадок, ступеней и др.), работающих в сухих условиях. Ангидритовый цемент может применяться в виде цементного теста для скрепления в изоляторах металлических частей с фарфоровыми, а также для изготовления искусственного мрамора. Конструкции и изделия на основе этого вяжущего нельзя использовать при относительной влажности воздуха более 70 %.

Отделочный ангидритовый цемент – разновидность ангидритового цемента. Он отличается более высокой степенью белизны (в порошке не менее 90 %). Из него готовят отделочные растворы, архитектурно-строительные изделия, а также искусственный мрамор в виде штукатурок и плит. Изделия обычно полируют, покрывают воском или парафином, что придает им блестящую поверхность и защищает от атмосферных воздействий.

Высокообжиговый гипс. Обжигом природного гипса или ангидрита при температурах 800...1000°С с последующим помолом получают вяжущее вещество, называемое высокообжиговым гипсом (эстрих-гипсом). В его структуре CaSO₄ частично разложен до CaO. Затвердевший высокообжиговый гипс отличается значительной плотностью и меньшей по сравнению со строительным гипсом водопроницаемостью. Поэтому он более стоек к действию воды и различных атмосферных воздействий. Тем не менее, изделия из эстрих-гипса не являются абсолютно водостойкими, поэтому он, также как и другие гипсовые вяжущие вещества, относится к воздушным вяжущим веществам.

Перемешанный с водой порошок эстрих-гипса образует пластичное тесто, которое очень медленно схватывается и твердеет. Твердеющую массу необходимо уплотнять для сближения отдельных зерен, как бы

склеивая их между собой. При уплотнении трамбованием или другим способом получается довольно плотная масса, которая после затвердевания превращается в прочный материал.

Начало схватывания высокообжигового гипса – не ранее 2 ч, конец – не нормируется. При твердении высокообжиговый гипс в отличие от строительного гипса претерпевает небольшое уменьшение объема. Затвердевший эстрих-гипс отличается высоким сопротивлением истиранию. Коэффициент истираемости составляет 0,04...0,06 кг/м² – это выше, чем у керамической плитки для полов. Марки по прочности эстрих-гипса 100, 150 и 200.

Цвет эстрих-гипса – белый. Введением в его состав различных красок можно получать цветные изделия, а отдельных кусков окрашенных пород – мозаичные изделия. Изделия из высокообжигового гипса мало тепло- и звукопроводны, но по сравнению с изделиями из строительного гипса отличаются высокой морозостойкостью, повышенной водостойкостью и меньшей склонностью к пластическим деформациям.

Высокообжиговый гипс может применяться для изготовления бесшовных полов и подготовок под линолеум. Его можно также применять для получения кладочных штукатурных растворов для внутренних стен зданий, искусственного мрамора и других строительных изделий [3].

2.1.1.5. Смешанные вяжущие вещества на основе гипса

Гипсо-цементно-пуццолановое вяжущее вещество (ГЦПВ) было предложено А. В. Волженским [11]. Оно может использоваться для производства строительных изделий, стойких в условиях повышенной относительной влажности окружающей среды. Это вяжущее состоит из 50...75 % строительного гипса, 15...25 % портландцемента и 10...20 % активных минеральных добавок. Оно отличается повышенной водостойкостью и быстрым твердением в начальные сроки за счет гидратации гипса и последующим гидравлическим твердением за счет новообразований, возникающих при гидратации цемента и взаимодействия друг с другом компонентов затворенного водой смешанного вяжущего. Положительной особенностью ГЦПВ является его способность к твердению во влажной и водной средах при такой же скорости схватывания и твердения, как и у строительного гипса.

Изделия из ГЦПВ характеризуются быстрым нарастанием прочности, что дает возможность изготавливать строительные изделия без пропаривания; вполне удовлетворительными прочностными

показателями (на ГЦПВ можно изготавливать бетоны марок 150 и 200, причем уже через 2...3 ч после изготовления достигается 30...40 % марочной прочности); повышенной водостойкостью и сульфатостойкостью. Морозостойкость изделий на ГЦПВ составляет от 25 до 50 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Бетоны на ГЦПВ характеризуются такими же упруго-пластичными свойствами, что и бетоны на портландцементе равнозначных марок.

ГЦПВ применяют для изготовления стеновых панелей санитарно-технических кабин и ванных комнат, вентиляционных каналов и других строительных целей. Изделия из ГЦПВ используются при возведении жилых домов малой этажности и зданий хозяйственного назначения.

2.1.2. Строительная воздушная известь

Строительной воздушной известью называется продукт обжига природных кальциево-магниевого карбонатных пород. Состоит в основном из CaO и в некотором количестве из MgO. Природные кальциево-магневые горные породы, из которых получают известь, состоят из CaCO₃, MgCO₃ и примесей в виде песка и глины. Чаще всего при производстве извести используют известняки и мел, так как их удобно обжигать. При нагревании в печах до температуры 900...1100°C они разлагаются с выделением CaO и CO₂:



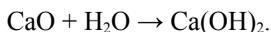
По назначению в народном хозяйстве известь подразделяют на строительную и технологическую. Первая используется в строительстве как самостоятельное вяжущее, вторая – в технологических процессах производства различных строительных материалов, например, в производстве силикатного кирпича, силикатного и ячеистого бетонов, при выплавке стали и т.п.

По условиям твердения строительная известь подразделяется на воздушную, твердеющую только в воздушных условиях и гидравлическую – способную твердеть, набирать прочность и сохранять ее как на воздухе, так и в воде.

Качество строительной воздушной извести оценивается по разным показателям, основным из которых является содержание в ней свободных CaO и MgO. Чем выше их содержание, тем выше качество (активность) извести. По активности известь разделяют на три сорта: в первом содержание активных оксидов не менее 90 %, во втором – не

менее 80 % и в третьем – не менее 70 %. Строительную воздушную известь выпускают следующих видов: негашеную комовую, негашеную молотую и гашеную.

Негашеная комовая известь (кипелка) представляет собой воздушную известь после обжига в печах известняка (мела). Негашеную молотую известь получают помолом в мельнице комовой извести-кипелки с различными минеральными добавками. Гашеную известь (пушонку) получают при воздействии на негашеную известь определенным количеством воды (гашением). Химизм процесса гашения протекает следующим образом:



Негашеная известь бурно взаимодействует с водой, выделяя большое количество тепла, вызывающее даже кипение воды, поэтому свое техническое название она получила «кипелка». Гашение извести сопровождается не только выделением тепла, но и большим увеличением объема продукта гашения, в результате чего образуется мелкодисперсный порошок, который называют пушонкой. Строительная воздушная известь отличается от других вяжущих веществ тем, что может превращаться в порошок не только при помолу, но и при гашении.

Известь-кипелка активно поглощает влагу из воздуха, рассыпаясь при этом в тонкодисперсный порошок. Кроме того, известь в присутствии влаги реагирует с углекислотой, содержащейся в воздухе. Это приводит к ее карбонизации, т.е. к превращению в CaCO_3 , что снижает активность извести. Поэтому известь хранят в крытых помещениях.

Важным свойством извести является способность обеспечивать высокую пластичность смесей. Пластичные свойства известкового теста объясняются наличием на поверхности погашенных зерен извести адсорбционных слоев воды, уменьшающих трение между зёрнами извести. Чем активнее известь и чем полнее она погашена, тем пластичнее получается известковое тесто.

Известковое тесто, защищенное от высыхания, неограниченно долго сохраняет пластичность, т.е. у извести отсутствует процесс схватывания. Затвердевшее известковое тесто при увлажнении вновь переходит в пластичное состояние. Сама известь – неводостойкий материал. Однако при длительном твердении (десятилетия) известь приобретает достаточно высокую прочность и относительную водостойкость (например, в кладке старых зданий). Это объясняется

тем, что известь на воздухе реагирует с CO_2 (как уже отмечалось), образуя нерастворимый в воде и довольно прочный CaCO_3 , т.е. как бы обратно переходя в известняк.

При гашении извести теоретически необходимым количеством воды получаемый продукт в 2...3,5 раза увеличивается в объеме и образует рыхлую, белого цвета, легкую порошкообразную массу $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В результате получается совершенно сухая гашеная известь (пушонка).

Важной качественной характеристикой извести является *скорость ее гашения*. Время гашения извести определяется началом подъема температуры до достижения максимальной температуры ее гашения. По времени гашения строительная негашеная известь подразделяется: на быстрогасящуюся (не более 8 мин), среднегасящуюся (8...25 мин) и медленногасящуюся (более 25 мин). Скорость гашения оказывает большое влияние на свойства полученных продуктов гидратации.

Плотность комовой негашеной извести зависит от температуры обжига и в среднем составляет 2200...2400 кг/м^3 (обожженной при 1000°C). Чем выше температура обжига, тем плотнее известь.

Прочность строительной воздушной извести не нормируется стандартом. Прочность гидратной извести-пушонки невелика и составляет через 28 сут твердения 0,5...1 МПа. Молотая негашеная известь отличается более высокой прочностью – до 1,0...5,0 МПа через 28 сут воздушного твердения.

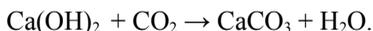
Молотая негашеная известь заметно отличается от гашеной и другими свойствами. Растворы на молотой негашеной извести получаются удобоукладываемыми при значительно меньшем количестве воды, чем растворы на гашеной извести-пушонке или известковом тесте и обладают повышенной прочностью. Строительные растворы на обычном известковом тесте схватываются в течение нескольких суток, а на молотой негашеной извести – в течение 30...60 мин. Молотая негашеная известь химически связывает воду значительно быстрее и в большем количестве, чем другие вяжущие вещества.

Известь связывает почти в 2 раза больше воды, чем строительный гипс, хотя скорости гидратации обоих вяжущих примерно одинаковы. Портландцемент связывает за месяц около 10 % воды от своей первоначальной массы. Иными словами, только на химическое связывание молотая известь потребляет в первые часы примерно в 3 раза больше воды, чем портландцемент в течение целого месяца. Благодаря этому замечательному свойству известь-кипелка используется в ряде случаев в качестве сушильного средства, к

примеру, в штукатурных растворах, и особенно в зимнее время. Изделия из нее получаются более плотными и более водостойкими по сравнению с изделиями на основе гашеной извести [11].

Карбонизация извести (при ее длительном хранении и особенно при наличии влаги) приводит к уплотнению, упрочнению структуры, а также к повышению водостойкости изделий, так как растворимость CaCO_3 в 40 раз меньше растворимости $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Активность извести при этом теряется. Поэтому хранение извести на открытом воздухе не допускается. Чтобы исключить подобные процессы, известь перевозится и хранится в закрытых емкостях, что улучшает экологическую обстановку окружающей территории и сохраняет качество извести.

При твердении строительных известковых растворов или известково-песчаных изделий на гашеной извести в условиях обычных температур мелкие частицы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в присутствии воды перекристаллизуются в более крупные. Растущие в растворе кристаллы гидроксида кальция (портландита) срастаются друг с другом, образуя известковый каркас, окружающий частицы песка. Наряду с этим при твердении извести происходит карбонизация $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за счет поглощения углекислоты воздуха:



Образование CaCO_3 , обуславливающее так называемое карбонатное твердение, протекает достаточно интенсивно только в присутствии влаги, что видно из приведенной выше реакции.

Растворы на гашеной извести твердеют весьма медленно. Стены, сложенные на известковом растворе, долгое время остаются сырыми, так как продолжается медленное выделение влаги. В толстых стенах зданий через много десятков, а то и сотен лет после их возведения обнаруживается сухой, а иногда даже пластичный **портландит***.

Д. И. Менделеев указывал, что камни скрепляются известью вначале в слабой степени, но в дальнейшем благодаря образованию углекислой, кремнекислой и других солей кальция прочность известкового раствора постепенно повышается.

Чистое известковое тесто из-за сильной усадки при высыхании растрескивается, вследствие чего к нему добавляют от двух до четырех объемных частей песка. Известь с песком образует весьма пластичный и удобообрабатываемый строительный раствор. При обычных

*Выделенные термины определены (см. словарь основных терминов).

условиях службы сооружений без подогрева и искусственного создания влажной среды химическое взаимодействие между песком и известью протекает весьма медленно и не имеет практического значения. Песок в известковом растворе служит скелетом, препятствующим изменению объема и растрескиванию раствора при высыхании. Кроме того, он удешевляет раствор и делает его более пористым, что облегчает удаление испаряющейся воды и доступ углекислоты вовнутрь. Сцепление частиц песка и извести получается достаточно прочным.

В известковом растворе должно быть столько извести, чтобы ее было достаточно (с небольшим избытком) для заполнения всех пустот между песчинками и обмазывания каждой из них известковым тестом. При большом избытке извести, а также при неравномерном ее распределении среди песчинок в местах скопления извести при затвердевании могут появиться трещины. Для известкового раствора лучше применять горный песок, состоящий из угловатых зерен. Речной песок состоит из круглых и окатанных зерен, имеет значительно менее развитую поверхность, что обуславливает меньшую прочность его сцепления с известью. Однако речной песок чище, чем горный. Не меньшее значение имеет и зерновой состав песка, причем желательно, чтобы промежутки между крупными песчинками заполнялись не известью, а мелкими зернами песка.

Долговечность известковых растворов и бетонов зависит от вида извести и условий ее твердения. Известковые растворы и бетоны – вполне воздухостойкие материалы. В воздушных условиях создаются наиболее благоприятные условия для их упрочнения вследствие карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ углекислотой воздуха. Во влажных же условиях известковые строительные растворы и бетоны постепенно теряют прочность и разрушаются. Разрушение при этом наступает особенно быстро, если бетоны и растворы подвергаются частому замораживанию и оттаиванию. Чем активнее в растворах и бетонах прошли процессы карбонизации извести, тем они более водостойки и морозостойки. Об этом убедительно свидетельствует длительная сохранность многих фасадов зданий, оштукатуренных известковыми растворами.

Строительная воздушная известь применяется в качестве вяжущего вещества для приготовления строительных растворов, работающих в воздушно-сухих условиях. Известковые растворы применяют при выполнении кирпичной и каменной кладки и для отделки стен зданий. Ее также используют для возведения сооружений, не подвергающихся

воздействию воды (наземных сооружений) в качестве бетонов низких марок [3].

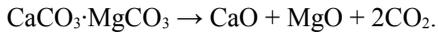
В большей степени строительная воздушная известь применяется для технологических целей. Ее используют в технологии силикатного кирпича, плотных силикатных и ячеистых бетонов. На основе извести получают смешанные гидравлические вяжущие (известково-шлаковые и известково-пуццолановые цементы), а также известковые красочные составы. Крупнейшим потребителем воздушной негашеной извести является металлургическая промышленность.

2.1.3. Магнезиальные вяжущие вещества

К магнезиальным вяжущим веществам относятся каустический магнезит и каустический доломит. Процесс производства этих материалов состоит из обжига природных магнезита и доломита соответственно и помола продуктов обжига. Магнезит при обжиге в температурном интервале 700...800°C декарбонизируется и превращается в MgO:



Качество каустического магнезита в значительной степени зависит от температуры и продолжительности обжига. Обжиг доломита происходит при температурах 700...900°C. Разложение протекает по схеме



Магнезиальные вяжущие вещества в отличие от других вяжущих затворяют не водой, а растворами хлористых и серноокислых солей. Наиболее распространенным затворителем, дающим лучшие результаты, является раствор хлорида магния. При затворении магнезиальных вяжущих водой получается камень небольшой прочности, а при затворении раствором хлорида магния – высокопрочное изделие. Затворенный раствором хлорида магния каустический магнезит называют еще *цементом Сореля*.

Строительные растворы на магнезиальных вяжущих с применением в качестве затворителя хлорида магния отличаются повышенной гигроскопичностью, что вынуждает в отдельных случаях применять другие виды затворителей, например, сульфат магния, железный купорос.

Каустический магнезит – порошок, состоящий в основном из MgO. Его схватывание и твердение обусловлено гидратацией этого

оксида. Сроки схватывания в основном зависят от температуры обжига и тонкости помола. Пережог и грубый помол замедляют, а более тонкий помол и недожог ускоряют процесс схватывания каустического магнезита. Обычно начало его схватывания наступает не ранее 20 мин, а конец – не позднее 6 ч от начала затворения.

Плотность каустического магнезита составляет 3100...3400 кг/м³. Он отличается свойством поглощать влагу и углекислоту из воздуха, в результате чего образуются Mg(OH)₂ и MgCO₃. Каустический магнезит необходимо упаковывать в плотную тару для предохранения его при перевозке от действия влаги и углекислоты воздуха.

Каустический магнезит является быстротвердеющим вяжущим веществом, обладающим высокой конечной прочностью. Согласно стандарту марки каустического магнезита следующие: 400, 500 и 600. Обычно через сутки прочность растворов и бетонов на магнезиальном цементе достигает 35...50 %, а через 7 сут – 60...90 % наибольшего значения [11].

Каустический доломит – порошок, состоящий из MgO и CaCO₃. Его плотность 2750...2800 кг/м³. Начало схватывания наступает через 3...10 ч, конец – через 8...20 ч после затворения. По сравнению с каустическим магнезитом каустический доломит обладает меньшей прочностью (марки 100, 150, 200 и 300). Каустический доломит должен содержать не менее 15 % MgO и не более 2,5 % свободной CaO. Строители считают, что многие свойства магнезиальных вяжущих лучше, чем у портландцемента. Так магнезиальные вяжущие обеспечивают весьма высокую огнестойкость и низкую теплопроводность, хорошую износостойкость и высокую прочность на сжатие и изгиб [12].

Магнезиальные вяжущие вещества являются воздушными, слабо сопротивляющимися действию воды, которая вымывает из них растворимые соли (хлорид магния и др.). Их можно использовать только при твердении на воздухе с относительной влажностью менее 60 %.

Магнезиальные вяжущие вещества применяются главным образом в смеси с древесными заполнителями (опилками, стружками, древесной шерстью и т.п.), которые в отличие от портландцемента не оказывают на них вредного влияния. Магнезиальные вяжущие применяются для изготовления ксилолита, фибролита, теплоизоляционных материалов, штукатурных растворов, искусственного мрамора, оснований под «чистые» полы, для производства строительных деталей и ряда других изделий.

2.2. Гидравлические вяжущие вещества

К гидравлическим вяжущим веществам относятся силикатные цементы (цементы на основе портландцемента), алюминатный (глиноземистый) цемент, романцемент и гидравлическая известь. В отличие от воздушных вяжущих, имеющих пониженную водостойкость, гидравлические вяжущие вещества с успехом твердеют как на воздухе, так и в воде. Этот факт очень важен и позволяет относить материалы на основе гидравлических вяжущих к более высокой качественной категории, чем материалы на воздушных вяжущих.

2.2.1. Портландцемент и его свойства

Портландцементом называется гидравлическое вяжущее вещество, полученное тонким помолом клинкера и гипса. Портландцементный клинкер получают в свою очередь обжигом до спекания известняково-глинистой сырьевой смеси. Добавка гипса (в количестве 3...5 % от общей массы измельчаемого материала) регулирует сроки схватывания цемента и является обязательной при получении любой разновидности портландцемента. Без гипса получается мгновенно схватывающийся цемент (быстряк), из него невозможно приготовить тесто.

Словом «цемент» древние римляне называли дробленый камень, щебень. Позднее этот термин перешел в название самого распространенного в настоящее время вяжущего.

Фазовый состав клинкера. Основными клинкерными минералами являются *алит* и *белит*. Это минералы-силикаты, состав и строение которых во многом определяет свойства портландцемента. Кроме этих минералов клинкер содержит так называемую промежуточную **фазу**, которая состоит из кристаллов *трехкальциевого алюмината* и *четырекальциевого алюмофerrита* (минералы-плавни) и аморфной *стеклофазы*. Все названные фазы представляют собой не чистые минералы, а твердые растворы, состав и строение которых зависят от состава сырьевой смеси, тонкости помола, режима обжига и других факторов.

Алит (трехкальциевый силикат). Полная формула $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, сокращенная – C_3S . Это самый главный клинкерный минерал, определяющий высокую прочность, быстроту твердения и ряд других свойств портландцемента. Он схватывается в течение нескольких

часов и относительно быстро наращивает прочность. В клинкере он содержится обычно в количестве 45...60 %.

Белит (двухкальциевый силикат). Полная формула $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, сокращенная – C_2S . Второй по значимости и содержанию минерал клинкера, отличается медленным твердением, но обеспечивает достижение высокой прочности при длительном (28-суточном) твердении портландцемента. Его содержание в клинкере составляет 15...30 %.

Трехкальциевый алюминат. Полная и сокращенная формулы $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и C_3A соответственно. Самый быстросхватывающийся минерал, но имеет небольшую прочность. Содержится в клинкере в количестве 4...12 %, является причиной сульфатной коррозии бетона. Этот минерал способствует быстрому росту прочности в первые сутки твердения вяжущего.

Четырехкальциевый алюмоферрит, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и C_4AF соответственно. Так же, как и трехкальциевый алюминат, обладает короткими сроками схватывания, но гидратируется (твердеет) медленно. В клинкере содержится в пределах 10...15 %.

Стеклофаза в клинкере представляет собой неравновесный продукт, образующийся в результате быстрого его охлаждения. Содержится в клинкере в количестве 5...15 %. Количество стеклофазы зависит от скорости охлаждения клинкера после выхода из зоны обжига. Состоит преимущественно из оксидов кальция, алюминия, железа и щелочей. Наличие стеклофазы способствует возрастанию тепловыделения и прочности в начальные сроки твердения портландцемента.

Свойства портландцемента. Цемент – это основа стройиндустрии. Портландцемент марок ПЦ400 и ПЦ500 применяется в основном для приготовления бетонных и железобетонных монолитных конструкций, сборного железобетона; портландцемент ПЦ550 и ПЦ600 – для гидротехнических сооружений, массивных сооружений из монолитного бетона, дорожного и аэродромного строительства, производства асбестоцементных изделий.

Следует различать строительно-технические свойства: а) цементного теста; б) цементных растворов и бетонных смесей; в) изделий на их основе. Свойства цемента влияют как на свойства растворов и бетонных смесей, так и на свойства изделий. К ним относятся минеральный состав, тонкость помола, гранулометрия, равномерность изменения объема. Свойства, характеризующие строительные растворы и бетонные смеси, включают живучесть (сроки схватывания), реологические свойства (удобоукладываемость),

нормальную густоту и водопотребность. Свойства изделий характеризуются прочностными показателями, усадкой и набуханием, водонепроницаемостью, долговечностью, трещиностойкостью, ползучестью.

Прочность цементного камня является важной характеристикой и оценивается пределом прочности при сжатии, изгибе и растяжении. Испытание цемента на прочностные характеристики регламентирует ГОСТ 10178–85. По прочности портландцементы делят на четыре марки: ПЦ400, ПЦ500, ПЦ550 и ПЦ600. Этим маркам соответствуют классы прочности (МПа): В22,5, В32,5, В42,5 и В52,5. Величину показателя предела прочности при сжатии цемента через 28 сут стандартного твердения называют его *активностью*. Факторы, влияющие на прочность цемента, могут быть разделены на химико-минералогические, технологические и технические.

Минералогический состав портландцемента оказывает чрезвычайно большое влияние на его прочность. При этом следует отличать конечную, максимально достигаемую прочность (высокопрочные цементы) и скорость ее нарастания (быстротвердеющие цементы). На прочность и скорость твердения наибольшее влияние оказывает алит. Белит твердеет медленно, набирая максимальную прочность примерно к году. Трехкальциевый алюминат в сочетании с другими составляющими клинкера способствует быстрому росту прочности в первые сутки твердения. Довольно активно ведет себя при твердении четырехкальциевый алюмоферрит. Если принять 28-суточную прочность за единицу для обычного портландцемента, то коэффициент набора прочности C_4AF к трем суткам составит 0,36, к семи – 0,65, к году – 1,5 [3].

Помимо химико-минералогических факторов на прочность влияют технологические факторы. Сюда в первую очередь следует отнести водоцементное отношение (В/Ц) – чем меньше эта величина, тем интенсивнее рост прочности и выше ее конечная величина. Такой рост происходит потому, что избыточное по сравнению с нужным количество воды увеличивает пористость цементного камня или бетона.

К технологическим факторам следует отнести тонкость помола цемента и его гранулометрический состав (остаток на сите № 008 должен быть не более 15 %, ГОСТ 10178–85). Рядовой портландцемент имеет тонкость помола, характеризующуюся удельной поверхностью 300...350 м²/кг. Увеличение тонкости помола до 400...450 м²/кг приводит к ускорению набора прочности, что используется в технологии производства быстротвердеющего цемента.

Однако при повышении удельной поверхности возрастает водопотребность. Чем выше тонкость помола цемента, тем быстрее он снижает свою активность при хранении на воздухе (более тонкий цемент имеет меньшее водоотделение). Увеличение тонкости помола цемента требует повышенного количества гипса как регулятора сроков схватывания.

Активность цемента связана не только с его тонкостью помола, но и гранулометрией. Цемент полидисперсного зернового состава позволяет получить более плотный цементный камень. Повышенное содержание тонких фракций в цементе обеспечивает быстрое нарастание прочности. Температура также оказывает на прочность цементного камня большое влияние [11].

На процессы твердения оказывают существенное влияние и химические добавки (главным образом на интенсивность набора прочности). Существуют добавки, которые могут интенсифицировать процессы твердения при пониженных температурах (например, смесь хлоридов натрия и кальция), или антикоррозионная и ускоряющая твердение комплексная добавка из нитрита и нитрата кальция.

К технологическим факторам, влияющим на активность цемента, можно отнести условия и продолжительность хранения на складе, поскольку на цемент воздействуют пары воды и углекислоты, образуя на поверхности частичек новообразования, которые значительно снижают активность цемента. Так, хранение в течение месяца быстротвердеющего тонкоизмельченного цемента переводит его в разряд обычных. Увеличивают устойчивость цементов при хранении гидрофобные вещества (добавки асидол-мылонафта, мылонафта, аминокислоты в количестве до 0,25 %). К техническим параметрам относятся также и условия твердения, поскольку цемент быстрее всего твердеет в воде или атмосфере, насыщенной водяными парами. Если относительная влажность воздуха падает до 40 %, то твердение практически прекращается.

Нормальная густота характеризует **реологические** свойства цементной пасты – это такая консистенция цементного теста, при которой подвижный стержень прибора Вика погружается в него на глубину, нормированную ГОСТ 310.3 и используется для определения рационального значения В/Ц (рис. 15).



Рис. 15. Прибор Вика

Водопотребность цементного теста представляет собой количество воды, которое нужно для получения теста нормальной густоты. Чем больше воды содержится в цементном тесте, тем выше пористость образующегося после твердения и высыхания цементного камня и, соответственно, ниже его прочность. Иными словами, при прочих равных условиях, чем меньше водопотребность вяжущего вещества, тем выше его качество. Портландцемент относится к вяжущим с наиболее низкой водопотребностью. Водопотребность портландцементов колеблется в пределах от 24 до 28 % (от массы цемента).

Она зависит от многих факторов – минералогического состава, тонкости помола, присутствия добавок. Водопотребность возрастает с увеличением тонкости помола, содержания алюминатов, активных минеральных добавок. Следует отметить, что добавки поверхностно-активных веществ, вводимых при помолке клинкера, оказывают разжижающее действие. Таким путем можно регулировать водопотребность.

Схватывание цементного теста – это загустевание, потеря цементной пастой подвижности. Одним из наиболее важных технических свойств цемента является быстрота схватывания. Из схватившегося теста формирование изделий становится затруднительным (начало схватывания) или невозможным (конец схватывания). Сроки схватывания должны быть такими, чтобы приготовленный раствор или бетонная смесь могли быть использованы по назначению, т.е. до того, как они потеряют подвижность. Сроки схватывания можно регулировать введением различных добавок. Так, широко используют введение при помолке 3...6 мас. % двуводного гипса, который при затворении цемента водой образует гидросульфат алюмината кальция, называемый также *этtringитом* ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$), который обволакивает зерна цемента тонкой пленкой, препятствуя таким путем реакции гидратации. Замедляют также схватывание бора, фосфат натрия, сахар, а также увеличение В/Ц и понижение температуры. Ускоряют схватывание соли кальция, сода, силикат натрия (вводимые в количестве до 1,5 %), а также повышение тонкости помола, температуры воды затворения и снижение В/Ц.

Вяжущее тем ценнее, чем быстрее нарастает его прочность после начала схватывания и, следовательно, чем меньше разрыв во времени

между его началом и концом. Сроки схватывания цементов зависят от многих факторов и подчиняются регулированию в довольно широких пределах с учетом требований, предъявляемым к вяжущим, применяемым в строительстве. Определяют сроки схватывания в тесте нормальной густоты по глубине погружения в него иглы Вика. Для обычного портландцемента, согласно ГОСТ 10178–85, начало схватывания должно наступать не ранее 45 мин, конец – не позднее 10 ч с момента затворения водой цементного теста.

Ложное схватывание – практически мгновенное схватывание, которое, однако, после перемешивания дает тесто с нормальными сроками схватывания и без потерь прочности. Причина этого явления заключается в гидратации обезвоженных кристаллогидратов (например, полуводного гипса), которые образуются в результате повышенной температуры при помеле.

Равномерность изменения объема – признак, обуславливающий целостность изделия из цементной пасты, поскольку цементы с неравномерным расширением объема приводят к снижению или полному разрушению бетонного изделия. Причина неравномерного расширения объема – присутствие в цементе свободной пережженной СаО или MgO, т.е. соединений, реакции гидратации которых начинаются после гидратации основных клинкерных минералов и идут медленнее.

Тепловыделение при твердении. Поскольку гидратация клинкерных минералов – экзотермический процесс, то при формировании цементного камня или бетона на его основе происходит выделение тепла. Тепловыделение приводит к разогреву всей массы бетона, что в зависимости от условий строительства может играть как положительную, так и отрицательную роль. При зимнем бетонировании высокое тепловыделение замедляет охлаждение уложенного бетона, способствует развитию процессов гидратации и твердения и таким образом, полезно. В других условиях тепловыделение приводит к появлению термонапряжений в массе бетона, в результате чего могут возникнуть и развиваться трещины, приводящие к разрушению. Тепловыделение зависит в основном от минералогического состава цемента. Эта зависимость связана, во-первых, с суммарным термохимическим эффектом различных клинкерных минералов при гидратации и, во-вторых, со скоростью взаимодействия этих минералов с водой. Установлено, что алит и трехкальциевый алюминат отличаются не только большим суммарным, но и быстрым тепловыделением, в то время как белит и четырехкальциевый алюмоферрит низкотермичны и выделяют тепло

медленно. Увеличивают тепловыделение повышение содержания в клинкере стеклофазы, увеличение тонкости помола, различные добавки, ускоряющие гидратацию и твердение [3].

Плотность портландцемента в зависимости от его состава составляет 3000...3200 кг/м³. Другой технической характеристикой цемента служит его насыпная плотность, которая в рыхлом состоянии колеблется от 900 до 1000 кг/м³, в уплотненном – от 1400 до 1700 кг/м³. В практических расчетах чаще всего используют усредненное значение насыпной плотности – 1200 кг/м³. Цементы с пониженной плотностью при прочих равных условиях более экономичны. Цементы с повышенной плотностью применяются для тампонирования нефтяных скважин, для сооружения защитных устройств от ядерных излучений. Повышения плотности добиваются увеличением железистых составляющих, а также введением оксида бария. Пониженной плотностью обладают шлаковые и пуццолановые цементы.

Усадка и набухание цементного камня. Если цементный или бетонный образец поместить в среду, относительная влажность которой ниже равновесной влажности образца, то последний со временем уменьшит свои линейные размеры – даст усадку. Это явление происходит вследствие высыхания изделия – испарения свободной воды из пор и капилляров. С высыханием воды связано проявление капиллярных сил – сил сжатия, которые могут быть столь значительны, что вызывают появление напряжений в материале и образование трещин. Если же влажность окружающей среды выше равновесной влажности материала, то его водосодержание начинает расти и сопровождается увеличением объема образца – его набуханием. Набухание тоже вызывает появление внутренних напряжений, но менее интенсивных, чем при усадке.

На величину усадки цементного камня влияет много факторов. Так, алитовые и более грубомолотые цементы меньше склонны к усадке. Снижение В/Ц, при прочих равных условиях, ввод порошкообразных заполнителей также приводят к снижению усадки. Повышают усадку добавка хлорида кальция, обработка цементного камня или бетона паром под давлением в автоклавах.

Трещиностойкость. Трещины возникают в результате напряжений и деформаций в цементном камне или бетоне под действием механических нагрузок, температурных, влажностных и объемных перепадов. Трещиностойкость бетонов можно повысить, снижая усадку, ползучесть цементного камня, а также вводя добавки поверхностно-активных веществ.

Ползучесть цементного камня или изделий из него – способность необратимо деформироваться под действием механических и других факторов. Ползучесть зависит от достигнутой прочности цементного камня или бетона перед нагрузкой и она тем меньше, чем больше прочность перед нагружением. Она практически затухает к двум годам после нагружения конструкции. Оказывает влияние на ползучесть также и минералогический состав.

2.2.2. Разновидности портландцемента

Описанные в этой главе разновидности отличаются от обычного портландцемента специальными свойствами, химическим составом, особенностями применяемого сырья и технологии производства.

Быстротвердеющий и высокопрочный цементы. Для ряда строительных нужд и, в частности, для изготовления сборных железобетонных конструкций и деталей, а также для скоростного строительства необходим быстротвердеющий цемент для которого характерно более интенсивное, чем для обычного портландцемента, нарастание прочности в начальный период твердения. В отдаленные сроки нарастание прочности в нем замедляется и через длительный период может достигнуть прочности обычного портландцемента.

Прочность при сжатии быстротвердеющего цемента марок М400 и М500 через 3 сут должна быть, согласно ГОСТ 10178–85 соответственно не менее 25 и 28 МПа, а через 28 сут – 40 и 50 МПа, т.е. за первые трое суток такой цемент набирает более половины прочности от 28-суточного твердения.

На предприятиях по производству сборных железобетонных конструкций и деталей применение быстротвердеющего цемента значительно ускоряет производственный процесс. Использование его для монолитного бетона сокращает сроки распалубки и снижает массу сооружения, так как высокая прочность получаемого при этом бетона позволяет уменьшить сечение конструкции.

Для получения предварительного напряжения бетона высоких марок необходим высокопрочный портландцемент. Прочность при сжатии этого цемента в 28-мисуточном возрасте (ГОСТ 10178) должна быть не менее 60 МПа. Этот цемент не должен обладать признаками «ложного схватывания».

И. В. Кравченко, М. Т. Власовой и Б. Э. Юдовичем был предложен особо быстротвердеющий портландцемент, обладающий не только быстрым нарастанием прочности в начальной стадии твердения, но и высокой прочностью через 28 сут. Его применение позволяет

отказаться от пропаривания изделий или уменьшить длительность, пропаривания, а также сократить расход цемента.

Содержание алита в быстротвердеющем цементе должно быть не менее 50 %, а в высокопрочном – не менее 60 %. К быстротвердеющему цементу можно добавлять до 10 % (от массы цемента) активных минеральных добавок и до 15 % доменных гранулированных шлаков. Эти добавки связывают выделяющийся при гидролизе алита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, тем самым ускоряя взаимодействие C_3S с водой. Особо быстротвердеющий цемент должен содержать не менее 55 % C_3S . В высокопрочном цементе допускается ввод до 5 % активных минеральных добавок. Тонкость помола обоих цементов должна быть не ниже 350 м²/кг, а особо быстротвердеющего – не менее 400 м²/кг. Положительное влияние более тонкого помола заключается в ускорении процессов гидратации зерен цемента за счет их более тонкой дисперсности, а следовательно, и в повышении прочности в начальные сроки после затворения водой. При более тонком помоле цемента необходимо вводить в его состав повышенное количество гипса. Нужно не допускать при помоле повышенной температуры цемента во избежание ложного схватывания. Быстротвердеющий и высокопрочный цементы вследствие тонкого измельчения и повышенного содержания C_3S сравнительно быстро теряют свою активность при длительном хранении и дальних перевозках.

Скорость нарастания прочности можно повысить также путем различных химических добавок (хлоридов кальция, магния, натрия), а также введением кристаллических затравок из предварительно гидратированного цемента.

Мощным средством ускорения процесса твердения изделий из цемента является тепловлажностная обработка (пропарка), которая осуществляется в пропарочных камерах паром при атмосферном давлении. При этом прочность быстротвердеющего цемента при сжатии после пропаривания через 1 сут достигает 70...90 % от прочности цемента, твердеющего 28 сут при обычных температурах.

Портландцементы с поверхностно-активными добавками. Для улучшения свойств портландцемента к нему добавляют органические поверхностно-активные вещества (ПАВ). Эти добавки в малых дозах вводят в состав вяжущих при их помоле или при затворении водой в процессе приготовления растворных и бетонных смесей.

Портландцементы с ПАВ-добавками делят на две группы: 1) цементы с гидрофилизирующими добавками, повышающими или не уменьшающими степень смачивания цементов водой и 2) цементы с

гидрофобизирующими добавками, понижающими смачивание цементов водой. К первой группе относится *пластифицированный портландцемент*, представляющий собой продукт тонкого измельчения клинкера и гипса совместно с лигносульфонатом техническим (ЛСТ) – отходом целлюлозно-бумажного производства. Во вторую группу входит *гидрофобный портландцемент*, в состав которого при помол вводят добавки, гидрофобизирующие зерна цемента (мылонафт, асидол-мылонафт, олеиновая кислота и др.). К этой же группе относятся цементы с воздухововлекающими добавками, вводимыми при затворении водой в процессе приготовления растворных и бетонных смесей. К таким добавкам относятся, например, омыленный древесный пек и абитат натрия.

Пластифицированный портландцемент. Пластифицирующей добавкой в таком цементе являются жидкие концентраты ЛСТ в количестве 0,15...0,25 % от массы цемента. Его марки такие же, как и у обычного портландцемента. Главное отличие пластифицированного портландцемента от обычного – более высокая пластичность.

Пластифицирующее действие ЛСТ объясняется тем, что ее частицы, адсорбируясь на цементных зернах, образуют на их поверхности защитные адсорбционные пленки гидрофильного действия. Эти пленки препятствуют сцеплению гидратирующихся зерен цемента и их агрегации с образованием хлопьев (флокул) и переводят, таким образом, структуру цементно-вяжущей **суспензии** из **коагуляционной** в **пептизационную**. При этом уменьшается сопротивление цементного теста сдвигу и повышается пластичность свежесозданных растворных и бетонных смесей. С увеличением пластичности улучшается подвижность и удобообрабатываемость и снижается водопотребность этих смесей. Пластифицирующее действие зависит от минералогического состава цемента, наличия тонкомолотых добавок и вида ЛСТ.

Используя добавку ЛСТ, можно для получения растворных и бетонных смесей той же подвижности добавлять в них меньше воды, что повышает прочность, морозостойкость и водонепроницаемость бетона. Если же сохранить ту же подвижность бетонной смеси и стремиться к такой же прочности бетона, то можно снизить расход цемента на м³ бетонной смеси. Пластифицирующее действие приводит к снижению В/Ц, а пептизирующее – к препятствию агрегации цементных частиц.

Пластифицированный цемент используют наравне с обыкновенным портландцементом для бетонных и железобетонных надземных, подземных и подводных конструкций, в особенности подвергающимся

многократному попеременному замораживанию и оттаиванию или увлажнению и высыханию. Его можно применять для производства обычных и предварительно напряженных сборных бетонных и железобетонных конструкций, а также в строительных растворах на основе сложных вяжущих из цемента, извести и различных молотых минеральных добавок.

Гидрофобный портландцемент изготавливают путем введения 0,1...0,3 % гидрофобизирующих добавок при помоле клинкера. Гидрофобизирующие ПАВ образуют на зернах цемента тончайшие (мономолекулярные) адсорбционные пленки из ориентированных ассиметрично-полярных молекул, которые обладают водоотталкивающими свойствами.

Гидрофобизированный цемент менее гигроскопичен, чем обычный цемент, и не смачивается водой. Поэтому гидрофобный портландцемент способен сохранять активность при длительном транспортировании и хранении даже во влажной среде и не комковаться при кратковременном воздействии воды. Однако несмачиваемость не препятствует изготовлению на гидрофобном цементе строительных растворов и бетонов обычным путем, так как пленки на цементных зернах не сплошные, кроме того, при перемешивании цемента с водой в присутствии песка, щебня и других заполнителей адсорбционные пленки, обволакивающие цементные частицы, как бы частично сдираются и гидрофобный цемент образует однородную, нормально твердеющую растворную или бетонную смесь с повышенной пластичностью. Вследствие пенообразующей способности гидрофобизирующих добавок в растворах или бетонах образуются эмульсии пузырьков воздуха. В результате воздухосодержание свежесозданных строительных смесей, изготовленных на гидрофобном цементе на 3...5 % выше, чем на портландцементе. Гидрофобизирующие добавки сохраняются и при твердении, влияя на этот процесс. Вследствие этого затвердевшие растворы и бетоны, изготовленные на гидрофобном цементе, характеризуются несколько меньшим капиллярным подсосом воды, повышенной водонепроницаемостью и морозостойкостью, а также пониженным водопоглощением.

В растворных и бетонных смесях гидрофобные цементы повышают пластичность и позволяют при сохранении подвижности и удобоукладываемости соответственно снизить В/Ц и расход цемента. Гидрофобные пленки на зернах цемента тормозят процессы гидратации и твердения цемента. Однако практически за счет пониженной водопотребности, а также повышенной тонкости помола

прочность гидрофобных цементов почти не уступает прочности обычных.

Гидрофобный портландцемент рекомендуется применять взамен обычного в тех случаях, когда необходимы длительное хранение и перевозки на дальние расстояния. Этот цемент можно применять для тех же целей, что и пластифицированный портландцемент.

Сульфатостойкий портландцемент (ССПЦ). В клинкере, используемом для изготовления ССПЦ, должно содержаться не более 5 % C_3A и не более 50 % C_3S . ССПЦ не должен содержать активных или инертных минеральных добавок, поскольку они снижают морозостойкость бетона.

Для повышения морозостойкости сооружений, служащих в суровых условиях попеременного замораживания и оттаивания в агрессивной среде, в состав цемента вводят пластифицирующие, воздухововлекающие и газообразующие добавки.

ССПЦ предназначен для бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся действию сульфатных вод преимущественно в условиях переменного горизонта воды при систематическом замораживании и оттаивании или увлажнении и высыхании. Для подводных частей морских сооружений применяют сульфатостойкий пуццолановый портландцемент.

Пуццолановые цементы. Вяжущие вещества, содержащие активные минеральные добавки, называются пуццолановыми. Их различают по виду исходного вяжущего и используемой добавки.

Активные минеральные добавки. Активными минеральными или гидравлическими добавками называют природные и искусственные материалы, которые при смешении в тонкоизмельченном виде с воздушной известью придают ей свойства гидравлического вяжущего вещества, а в смеси с портландцементом повышают водо- и сульфатостойкость

Взаимодействие извести с активными минеральными добавками основано на том, что содержащийся в последних аморфный мелкодисперсный кремнезем связывает известь в присутствии воды в гидросиликаты кальция, что обуславливает ее гидравлическое твердение, т.е. нарастание прочности под водой после предварительного затвердевания на воздухе. Кроме кремнезема в состав активной минеральной добавки может входить глинозем, который в присутствии влаги также взаимодействует с известью, образуя гидроалюминаты кальция, обладающие гидравлическими свойствами.

Активные минеральные добавки бывают природного и искусственного происхождения. К первым относятся осадочные породы: диатомиты, трепелы, опоки, глиежи, а также вулканические породы – пеплы, туфы, пемзы, трассы и т.д. Ко вторым – доменные гранулированные шлаки, белитовый (нефелиновый) шлак, тонкоизмельченный бой керамического кирпича, золы-унос от сжигания твердого топлива. Все эти добавки в порошкообразном состоянии при затворении водой самостоятельно не затвердевают.

Пуццолановый портландцемент. Пуццолановым портландцементом (ППЦ) называется гидравлическое вяжущее вещество, полученное путем совместного помола портландцементного клинкера с активной минеральной добавкой или тщательного смешивания в сухом виде тех же отдельно измельченных материалов и твердеющее в воде или во влажных условиях.

Содержание активных минеральных добавок в зависимости от их состава и свойств составляет от 20 до 40 %. Их наличие ускоряет гидратацию ППЦ. Вслед за этим активная составляющая добавок вступает во взаимодействие с продуктами гидратации портландцемента, в первую очередь, с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, переводя его в нерастворимое соединение.

Пуццолановые цементы по сравнению с обычным портландцементом более стойки по отношению к выщелачиванию пресной водой и воздействию минерализованных вод. При взаимодействии с водой и $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующимся при гидратации портландцемента, отдельные зерна измельченной добавки увеличиваются в объеме (набухают). Это вызывает уплотнение раствора и бетона. Уплотнение повышает также водо- и солестойкость ППЦ, так как затрудняет проникновение агрессивных вод внутрь бетонного массива и препятствует разрушению бетона.

ППЦ твердеет медленнее, чем портландцемент. В первые сроки он обладает существенно меньшей прочностью, чем портландцемент. Однако в дальнейшем прочность ППЦ нарастает, причем, чем активнее добавка, тем быстрее это происходит. Поэтому растворы и бетоны на ППЦ должны твердеть во влажной среде более продолжительное время, чем изделия из портландцемента.

Марки ППЦ (ГОСТ 22266–94) М300 и М400. При твердении ППЦ вследствие более медленного течения этого процесса выделяется меньше тепла, чем при твердении портландцемента. Водоотделение при дальнейшем твердении на воздухе ППЦ меньше, чем у портландцемента, усадка и набухание ППЦ при твердении на воздухе и в воде более высокие, чем у портландцемента, т.е. в очень сухой

воздушной среде отвердевший ППЦ иногда может обнаружить «сброс» прочности.

ППЦ уступает портландцементу по воздухоустойкости. При достаточно длительном твердении во влажных условиях цементный камень из ППЦ при дальнейшем твердении на воздухе обычно не обнаруживает снижения прочности. Однако прирост прочности в этом случае значительно меньше, чем при хранении в воде.

Применять ППЦ при пониженных температурах нецелесообразно, так как при этом сильно замедляется и без того медленное твердение этого цемента. Наоборот, повышенная температура в сочетании с влажной средой дает благоприятные результаты. Поэтому ускорение твердения ППЦ путем тепловлажностной обработки дает относительно больший эффект, чем для портландцемента. ППЦ обнаруживает меньшую морозостойкость, чем портландцемент.

Прочность ППЦ при длительном хранении (на складах) понижается быстрее, чем прочность портландцемента, вследствие высокой гигроскопичности активных минеральных добавок. Поглощая влагу из воздуха, они вызывают гидратацию некоторых частиц ППЦ. Для повышения сульфатостойкости ППЦ изготавливают из клинкера с пониженным содержанием C_3A (не более 8 %). Следует отметить, что ППЦ относится к группе сульфатостойких портландцементов.

ППЦ применяют для подводных и подземных бетонных и железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию мягких пресных и сульфатных вод. Его можно использовать и для конструкций и строительных растворов, находящихся в условиях повышенной влажности, для внутримассивного бетона гидротехнических сооружений. Вследствие пониженной воздухо- и морозостойкости этот цемент не рекомендуется использовать в наземных бетонных и железобетонных конструкциях в условиях воздушного твердения. Наблюдающееся при этом быстрое высыхание может приостановить твердение и вызвать значительную усадку цемента. Не рекомендуется также применять ППЦ для тех частей сооружений, которые находятся на уровне воды, в условиях попеременного увлажнения и высыхания, замораживания и оттаивания.

Другие виды ППЦ. Известьесодержащие гидравлические вяжущие вещества изготавливают путем измельчения негашеной кальциевой или гидравлической извести совместно с гранулированным шлаком или активной минеральной добавкой. Известьесодержащие вяжущие применяют для приготовления строительных растворов и бетонов марок не более М200.

Известково-пуццолановым вяжущим называется гидравлическое вяжущее вещество, полученное путем совместного помола высушенных активных минеральных добавок с известью или тщательным смешением в сухом виде тех же раздельно измельченных материалов. Наряду с воздушной известью можно использовать и гидравлическую известь. Содержание извести в известково-пуццолановом вяжущем обычно составляет 15...30 %.

Известково-пуццолановое вяжущее целесообразно применять преимущественно для растворов и бетонов низких марок в подземных или подводных сооружениях и для изготовления изделий с применением тепловлажностной обработки. Использовать эти вяжущие в наземных сооружениях можно только при систематическом увлажнении в первые сутки твердения.

Известково-зольным вяжущим называется гидравлическое вяжущее вещество, полученное либо совместным помолом сухой топливной золы или шлака с известью, либо тщательным смешением в сухом виде тех же раздельно измельченных материалов.

Шлаковые цементы. Шлаки являются отходами, образующимися при плавке чугуна и различных металлов и при сжигании минерального топлива. В зависимости от происхождения шлаки делят на две большие группы: металлургические и топливные, различающиеся химическим и минеральным составами, структурой, вследствие чего их химические, физические и технические свойства оказываются весьма различны.

Для производства шлаковых цементов преимущественное применение получили доменные шлаки. Их гидравлические свойства определяются минералогическим составом и соотношением кристаллической и стекловидной фаз. Минеральный состав большинства доменных металлургических шлаков близок к цементным клинкерам.

Способность тонкомолотых кристаллических и стекловидных шлаков взаимодействовать с водой и затвердевать в прочный камень называют их *гидратационной активностью*. Полностью закристаллизованные основные и кислые доменные шлаки обладают весьма незначительными вяжущими свойствами или вовсе лишены их.

Шлакопортландцементом (ШПЦ) называют гидравлическое вяжущее вещество, полученное путем совместного помола портландцементного клинкера, гипса и гранулированного доменного шлака или тщательным смешением в сухом виде тех же раздельно измельченных компонентов. По ГОСТ 10178–85, содержание шлака в ШПЦ должно находиться в пределах от 21 до 60 мас. %.

Твердеет ШПЦ в первые 60 сут медленнее, чем портландцемент. Однако в дальнейшем скорость его твердения повышается и к 6...12 месяцам прочность образцов ШПЦ приближается к прочности образцов из портландцемента или даже превышает их. Повышение прочности вызывается постепенной гидратацией шлака, а также хорошим сцеплением образующихся кристаллогидратов с негидратированными зёрнами шлака и клинкера. Чем больше шлака в ШПЦ, тем медленнее он твердеет. Оптимальное содержание шлака в ШПЦ – 30...40 %.

Повышение температуры, не сопровождающееся испарением воды из твердеющего цементного камня, также ускоряет гидратацию и твердение ШПЦ, поэтому изделия на основе этого вяжущего целесообразно подвергать тепловлажностной обработке в пропарочных камерах. Интенсифицируют процесс твердения и некоторые добавки – хлориды натрия, кальция, алюминия, железа.

Согласно ГОСТ 10178–85 ШПЦ выпускают трех марок: ШПЦ 300, ШПЦ 400 и ШПЦ 500. Он несколько светлее портландцемента и характеризуется меньшей активностью, но в возрасте года изделия из ШПЦ и портландцемента имеют практически одинаковую прочность. При низких температурах (0...10°C) ШПЦ твердеет значительно медленнее, чем портландцемент, а при пропаривании, наоборот, быстрее. Пропаренные бетоны на основе ШПЦ показывают более высокую прочность, чем бетоны на портландцементе.

Тепловыделение при твердении ШПЦ зависит от его состава, но во всех случаях в течение первых трех суток значительно меньше величины тепловыделения при твердении портландцемента. Это свойство позволяет применять ШПЦ в массивных бетонных сооружениях.

Объемные деформации (усадка и набухание) цементного камня на ШПЦ меньше, чем на портландцементе, а водоудерживающая способность примерно одинакова. Воздухостойкость и морозостойкость ШПЦ высокие, но несколько меньшие, чем портландцемента. Для ШПЦ неблагоприятны раннее высыхание и служба в зоне переменного уровня вод.

Структура ШПЦ более плотная, чем у обычного портландцемента. Он более устойчив, чем портландцемент, в пресных и сульфатных водах вследствие пониженного содержания в цементном камне на его основе свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Стойкость против агрессивного воздействия углекислых вод у него примерно такая же, как и у портландцемента. ШПЦ отличают повышенная жаростойкость, и хорошая сцепляемость с арматурой в бетоне.

Производство ШПЦ является экономически выгодным, так как в состав цемента вводится большое количество шлака. При этом осуществляется экономия в топливе, электроэнергии, уменьшаются трудозатраты. Стоимость ШПЦ на 30...40 % ниже стоимости портландцемента.

Области применения ШПЦ весьма разнообразны. Его используют для изготовления бетонных и железобетонных изделий, при каменной кладке и в качестве штукатурного материала. Из бетонов на его основе возводят массивные наземные и подводные сооружения, подвергающиеся воздействию агрессивных водных сред. Как уже отмечалось, он обладает повышенной жаростойкостью. Не рекомендуется применять ШПЦ в конструкциях и сооружениях, подвергающихся попеременному замораживанию и оттаиванию, увлажнению и высушиванию.

Расширяющийся цемент. Цементный камень, приготовленный на основе практически всех гидравлических вяжущих веществ, испытывает усадочные деформации, что приводит к появлению трещин в местах соединения отдельных бетонных и железобетонных элементов сооружения. Это обстоятельство нарушает монолитность конструкции и делает ее более проницаемой для воды. Плотная заливка стыков и примыкающих частей сооружений может быть осуществлена лишь цементами, объем пластической массы которых после затвердевания либо не изменяется, либо несколько увеличивается вследствие расширения за счет внутренних сил. Цементы, изделия на основе которых характеризуются приращением объема, носят название *расширяющихся*.

Механизм расширения цементного камня. Расширение объема твердеющего цементного камня вызывается химическими реакциями гидратации CaO , MgO , поскольку гидроксиды кальция и магния занимают примерно в 2 раза больший объем, чем исходные оксиды и образования комплексных солей типа этtringита. При взаимодействии растворенного в воде гипса с кристаллами гидроалюминатов кальция образуется этtringит, кристаллы которого имеют форму игл, не вмещающихся в объеме, который занимали кристаллы гидроалюминатов кальция, что вызывает расширение данного участка камня.

Расширяющийся портландцемент является гидравлическим вяжущим веществом, полученным путем совместного помола портландцементного клинкера, высокоглиноземистого шлака, гипса и активной гидравлической добавки. Такой цемент должен содержать не менее 7 % алюминатов кальция и более 53 % алита. Структура

затвердевшего цементного камня сложена кристаллами гидросиликатов кальция (матрица), а расширение ее вызывается образованием кристаллов гидросульфалоуминатов кальция. Назначение гидравлической добавки (трепела, опоки, бентонита) в цементе – поглощать из водного раствора CaO, выделяющийся при гидратации C_3S и обеспечивать высокую скорость перехода в раствор также и Al_2O_3 , необходимого для образования гидросульфалоумината кальция.

По показателям прочности расширяющийся цемент имеет три марки: M400, M500 и M600. Изделия на его основе характеризуются достаточно высокой водонепроницаемостью, морозостойкостью и стойкостью в агрессивных средах. Расширяющийся цемент интенсивно твердеет при тепловлажностной обработке, однако в таких условиях цементный камень практически не расширяется.

Расширяющийся цемент предназначен для получения безусадочных и расширяющихся водонепроницаемых растворов и бетонов, для заделки различных швов, изготовления железобетонных деталей и конструкций и ряда других целей. Расширяющийся цемент как бы сам уплотняет себя, делая бетон водонепроницаемым. А в случае, если расширяющийся цемент используется в железобетонных конструкциях, эффект расширения вяжущего может вызвать натяжение арматуры и, как следствие, сжатие самого бетона, что дополнительно защитит бетон от трещин. Такие цементы называют *напрягающими*.

Белый и цветные портландцементы. Белый цемент отличается от обычного тем, что содержит минимальное количество железистых и других окрашивающих соединений и имеет поэтому не зеленовато-серую, а белую окраску. Состав его клинкера в основном представлен минералами C_3S , C_2S и C_3A , содержание алюмоферритов в нем незначительно.

Для производства белого цемента используются сырьевые материалы, не содержащие окрашивающих портландцемент веществ, главным образом Fe_2O_3 , MnO_2 , Cr_2O_3 и TiO_2 , а помол полученного белого клинкера осуществляется в мельницах, в которых футеровка и мелящие тела изготовлены из особо износоустойчивых металлических и неметаллических материалов (уралита, кремнистого песчаника и т.д.) в целях предотвращения присадки железа.

Отбеливающий эффект вызывается также отбеливанием клинкера в специальном аппарате – отбеливателе, где происходит восстановление Fe_2O_3 до закись-окиси Fe_3O_4 , что снижает красящую способность

соединений железа. Путем отбеливания удастся получить после помола чисто белый цемент без всяких оттенков.

Из белого цемента получают различные цветные цементы (желтый, розовый, красный, коричневый, зеленый, голубой, черный) путем совместного помола белого клинкера с красящими пигментами, которые должны обладать щелочестойкостью, светостойкостью и не создавать вредных для качества цемента примесей. Содержание в цветном портландцементе минеральных пигментов не должно превышать 15 %, а органических – 0,5 % (ГОСТ 15825–80).

Марки белого и цветных портландцементов М300, М400 и М500 (ГОСТ 965–89). Наряду с цветным портландцементом может изготавливаться и цветной ШПЦ, производимый из белого клинкера и содержащий 30...50 % светлого гранулированного доменного шлака.

Белый и цветные портландцементы следует хранить и транспортировать в таре (нельзя навалом). Для получения белых и цветных растворов применяют соответствующего цвета инертные материалы – белую и цветную мраморную, гранитную и известняковую крошку, белый кварцевый песок и т.д.

Белый и цветные цементы – прочные и долговечные декоративные материалы. Их применяют для архитектурно-отделочных работ в виде растворов, бетонов и различных побелок; облицовочного слоя крупных панелей и блоков; скульптур, различных строительных изделий; сухих строительных смесей, цементных красок, в производстве сухих строительных смесей.

Эти материалы обладают высокими эстетико-потребительскими качествами и отвечают самым жестким требованиям строительных регламентов и современным требованиям архитектуры и дизайна. Белый и цветные цементы являются эффективными материалами для изготовления различных строительных деталей: бетонных панелей, балконов, карнизов, декоративных украшений, тротуарных плит и камней для мощения улиц, мозаичных полов (рис. 16). Кроме того, белый и цветные цементы можно широко использовать в декоративном строительстве – дорожная разметка, бордюрные камни, облицовка туннелей. В реализации современных проектов ландшафтного дизайна возможности использования белого и цветных портландцементов неограниченны [13].

Портландцемент для бетонных покрытий автомобильных дорог. Бетонные покрытия автомобильных дорог и аэродромов в процессе эксплуатации испытывают большие перегрузки. Цемент для их изготовления должен отличаться повышенной прочностью на изгиб, высокими деформативной способностью, плотностью и

морозостойкостью, малой усадкой, большой прочностью на удар, малой истираемостью. Под деформативной способностью бетона понимают способность его в известной мере деформироваться, не разрушаясь, под влиянием внешней нагрузки, изменения температуры или усадки бетона.



Рис. 16. Фрагмент мозаичного пола (слева) и декоративное украшение на фасаде здания (справа)

Чтобы предотвратить возможность появления трещин, уменьшить длину плит, изменяют надлежащим образом минеральный состав клинкера и вводят специальные добавки. В дорожном строительстве лучшие результаты дает портландцемент с повышенным содержанием C_3S и C_4AF -фаз. В клинкере не должно быть более 10 % C_3A . Не разрешается вводить в этот цемент инертные и активные минеральные добавки, за исключением гранулированного доменного шлака, который можно вводить до 15 %. Начало схватывания дорожного цемента должно наступать не ранее, чем через 2 ч.

Дорожный цемент применяется в основном для однослойных и двухслойных дорожных бетонных покрытий, а также бетонных оснований усовершенствованных дорожных покрытий. Для первой цели используется портландцемент, пластифицированный и гидрофобный портландцементы М400, а для второй – М300.

Другие виды портландцемента. К специальным видам портландцемента следует отнести:

- цемент для защиты от радиационных излучений – содержит в своем составе Ba, Sr, B, Fe;
- цемент для жаропрочных бетонов – содержит тонкомолотые добавки магнезита, хромита, талька, шамота;
- магнезиальный портландцемент – содержит около 10 % MgO ;

- сланцезольный портландцемент – содержит добавку 15...25 % высокодисперсной золы от сжигания горючих сланцев;
- белитовый портландцемент – содержит добавку 30...60 % высушенного белитового шлама;
- цементно-полимерное вяжущее – содержит портландцемент с введением поливинилацетатной эмульсии, синтетических латексов, эпоксидных смол в количестве 1...20 %;
- цемент низкой водопотребности.

Последняя разновидность представляет собой продукт тонкого помола портландцементного клинкера совместно с добавками гипса, сухого суперпластификатора и активной минеральной добавки. Такую разновидность портландцемента называют *вяжущим низкой водопотребности* (ВНВ). Для получения ВНВ портландцемент домальвуют до удельной поверхности 450...500 м²/кг совместно с сухим пластификатором. При помоле цемента в присутствии пластификатора (в количестве до 3 %) происходит «микрокапсулирование» цементных частиц тончайшими оболочками из суперпластификатора. При этом достигается весьма низкая водопотребность (15...18 %), быстрый набор прочности в ранние сроки (через сутки 25...30 МПа), высокая конечная прочность (до 80...100 МПа).

Марки ВНВ характеризуют содержание клинкерной части (остальное – минеральные добавки): ВНВ-100 (100 % цемента), ВНВ-80 (80 % цемента) и т.д. С увеличением содержания активной минеральной добавки прочность ВНВ снижается, оставаясь, тем не менее, достаточно высокой, что объясняется нанохимической активацией составляющих ВНВ в процессе их совместного сухого помола. Использование ВНВ позволяет существенно сократить сроки строительства при возведении монолитных сооружений, изготавливать железобетонные конструкции в заводских условиях без использования тепловлажностной обработки [14, 15].

2.2.3. Глиноземистый цемент

Глиноземистый цемент представляет собой быстротвердеющее вяжущее вещество, являющееся продуктом тонкого измельчения обожженной до плавления или спекания сырьевой смеси, состоящей из бокситов и известняков и рассчитанной на преобладание в готовом продукте низкоосновных алюминатов кальция. В отличие от портландцемента глиноземистый цемент относится не к силикатным, а алюминатным цементам, а потому не является разновидностью

портландцемента. Он не содержит ни гипса, ни активных минеральных добавок.

Сырьем для производства глиноземистого цемента служат, как уже отмечалось, бокситы и известняки. Бокситами называются горные породы, состоящие в основном из $Al(OH)_3$ и содержащие в качестве примесей глинистые вещества, кварцсодержащие породы, оксиды железа.

Глиноземистый цемент в зависимости от условий получения изменяет свою окраску от светло-серой до коричневой и черной. Его средняя плотность $3000...3200 \text{ кг/м}^3$, насыпная (в уплотненном состоянии) – $1600...1800 \text{ кг/м}^3$. Количество воды, необходимое для получения из глиноземистого цемента теста нормальной густоты несколько выше, чем у портландцемента и составляет $25...28 \%$. Однако в отличие от портландцемента значительная часть воды идет на гидратацию клинкерных минералов глиноземистого цемента. В результате плотность затвердевшего камня глиноземистого цемента больше, чем у портландцемента, соответственно меньше усадка и выше морозостойкость. Глиноземистый цемент является быстротвердеющим, но не быстросхватывающимся продуктом: начало его схватывания должно наступать не ранее 45 мин, а конец – не позднее 12 ч после затворения водой, т.е. сроки схватывания почти такие, как и у портландцемента. С увеличением тонкости помола цемента и повышением температуры воды затворения сроки схватывания глиноземистого цемента сокращаются.

Отличительным свойством глиноземистого цемента является быстрое нарастание прочности при его твердении. По истечении 10...15 ч твердения прочность изделий из глиноземистого цемента оказывается достаточной для ввода их в эксплуатацию ($15...20 \text{ МПа}$), а к суточному возрасту составляет $80...90 \%$ от марочной. Согласно ГОСТ 969–91 глиноземистый цемент выпускают трех марок: М400, М500 и М600, причем в отличие от портландцемента марочная прочность глиноземистого цемента определяется через 3 сут со дня изготовления. В большинстве случаев максимум прочности достигается к 1...3 годам твердения, после чего прочность начинает снижаться. Максимальное значение прочности у глиноземистого цемента на $40...50 \%$ превышает их марочную прочность.

Пропаривание и автоклавная обработка изделий на глиноземистом цементе приводят к снижению их прочности (укрупнение кристаллов, рост пористости и т.п.), в связи с чем эти способы интенсификации твердения вяжущих веществ для глиноземистого цемента не применяются.

При использовании глиноземистого цемента в массивном бетоне во внутренней части последнего наблюдается повышение температуры до 60°C , что приводит к ослаблению кристаллической структуры цементного камня. Для предотвращения возможного понижения прочности бетона проводят следующие мероприятия:

1. Повышают теплоемкость бетона путем применения холодных заполнителей и холодной воды затворения и увеличивают его теплопроводность за счет повышения разности температур между поверхностной и внутренней частями бетона в результате интенсивной поливки последнего водой, осуществления бетонирования в малом объеме и преимущественно в зимнее время.

2. В состав глиноземистого цемента вводят до 20...25 % CaSO_4 который связывает гидроалюминаты кальция в сульфоалюминат кальция. Последний оказывается устойчивым при повышенных температурах и предотвращает понижение прочности бетона.

Глиноземистый цемент достаточно интенсивно твердеет и при пониженных положительных температурах. Так при 5°C прочность камня из глиноземистого цемента в возрасте 3 сут составляет около 80...90 %, а при температуре заморозания воды (0°C) – около 50 % от его марочной прочности. Затвердевает глиноземистый цемент и при температурах ниже температуры заморозания воды ($-1...-10^{\circ}\text{C}$). Способность глиноземистого цемента достаточно интенсивно твердеть при пониженных температурах объясняется его повышенной экзотермией в начальные сроки гидратации минералов, вследствие чего в массе бетона температура быстро поднимается до нормальной. Если же температура в массе бетона оказывается низкой, то твердение глиноземистого цемента, как и всех других вяжущих веществ, замедляется или прекращается совсем [2].

В возрасте до 1 сут тесто глиноземистого цемента уменьшает свой объем, а в последующие сроки наблюдается некоторое разбухание цементного камня. Затвердевший глиноземистый цемент отличается высокой стойкостью в минерализованных водах (в частности, в морской воде). Причинами этого являются повышенная плотность и водонепроницаемость бетона на глиноземистом цементе, отсутствие в составе цементного камня свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$, незначительная растворимость в воде гидроалюминатов кальция и защитное действие пленок из $\text{Al}(\text{OH})_3$, образующихся на гидратированных и негидратированных частицах цемента. Однако затвердевший глиноземистый цемент разрушается в растворах щелочей, поэтому его нельзя смешивать с порландцементом и известью.

Бетоны на основе глиноземистого цемента отличаются огнеупорностью, которая зависит от состава цемента и типа заполнителей и изменяется в пределах 900...1800°C. Огнеупорность глиноземистого цемента возрастает с увеличением содержания в нем Al_2O_3 , но активность и прочность его при этом понижаются.

Глиноземистый цемент стоит дороже портландцемента, поэтому он применяется лишь в тех случаях, когда экономически выгодно используются его специфические свойства. Быстрое твердение и высокая прочность делают глиноземистый цемент ценным материалом при проведении различных восстановительных работ: при прорывах плотин, труб и других аварийных работах, для ремонта дорог и мостов, при срочном возведении фундаментов и т.п.

Повышенная химическая стойкость позволяет применять глиноземистый цемент для тампонирувания нефтяных и газовых скважин. Широкое применение он получил на предприятиях пищевой промышленности, на бумажных и фотофабриках, на травильных и красильных предприятиях, для футеровки шахтных колодцев, тоннелей и во многих других отраслях народного хозяйства. На основе глиноземистого цемента производится огнеупорный бетон. Применяется он при зимнем бетонировании и для торкретирования. Глиноземистый цемент является компонентом многих расширяющихся цементов.

Нельзя использовать глиноземистый цемент в тех случаях, когда температура бетона во время его твердения может подняться выше 25...30°C, т.е. при саморазогреве бетона и в условиях жаркого климата. Недопустимо его применение в бетонных конструкциях, подвергающихся щелочной агрессии.

2.2.4. Гидравлическая известь

Гидравлическая известь получается при мягком режиме обжига карбонатных пород с высоким содержанием (8...20 %) глинистых веществ – мергелистых известняков. При обжиге в составе гидравлической извести образуется как свободный CaO, так и силикаты, алюминаты и ферриты кальция, обладающие гидравлическими свойствами. Производственный процесс заключается в обжиге сырья и превращении обожженного продукта в порошок путем помола или гашения. Практически гидравлическая известь обжигается в пределах 900...1100°C.

При твердении гидравлической извести протекают процессы, характерные как для воздушного, так и гидравлического твердения.

Первые обуславливаются твердением $\text{Ca}(\text{OH})_2$ аналогично воздушной извести, вторые процессы вызываются твердением силикатов, алюминатов и ферритов кальция; в результате их взаимодействия с водой образуются гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферриты кальция.

Плотность гидравлической извести составляет 2600...3000 кг/м³. Пластичность и удобообрабатываемость строительных растворов на гидравлической извести при прочих равных условиях меньше, чем растворов на воздушной извести. Гидравлическая известь – медленносхватывающееся вяжущее вещество. В зависимости от содержания в ней свободной CaO сроки схватывания колеблются в пределах: начало 0,5...2 ч, конец – 8...16 ч. При правильно выбранном режиме твердения строительные растворы и бетоны на гидравлической извести обладают более высокой прочностью, чем на воздушной извести. Растворы на гидравлической извести достигают прочности в 28-суточном возрасте 1,5...2,5 МПа и более. Гидравлическая известь прочнее воздушной, но отстает в этом отношении от многих вяжущих веществ.

Гидравлическую известь выпускают в небольшом количестве. Ее можно использовать для изготовления строительных растворов, применяемых для кладки и штукатурки как в сухой, так и влажной среде. Гидравлическая известь применяется наряду с воздушной известью, при этом получают водостойкие строительные растворы. Употреблять гидравлическую известь можно при приготовлении легких и тяжелых бетонов низких марок, применяемых в различных частях зданий. На ее основе изготавливают смешанные цементы – известково-шлаковый, известково-пущолановый и др.

2.2.5. Романцемент

Сырьем для производства романцемента служат мергели, в которых отношение между известковой и глинистой частями таково, что в результате обжига, не доводящего эти материалы до спекания, получается продукт, где вся или почти вся известь связывается в силикаты, алюминаты и ферриты кальция.

Романцемент состоит главным образом из C_2S , CA , C_3A_3 , C_2F и MgO . Ввиду отсутствия свободной извести или наличия ее в небольшом количестве, обожженный продукт при смачивании водой не гасится и, следовательно, не рассыпается в порошок. Романцемент превращается в порошок исключительно путем помола. Для замедления схватывания и улучшения свойств романцемента

допускается введение в его состав при помоле до 5 % гипса. Разрешается также вводить до 15 % гидравлических добавок.

Обжигают романцемент при 1000...1100°C. При этом необходимо стремиться к возможно более полной декарбонизации CaCO_3 , образованию силикатов и алюминатов кальция, а также к получению активной, способной к гидратации магнезии.

Плотность романцемента 2600...3000 кг/м³. Ввиду небольшого содержания свободного CaO (по сравнению с гидравлической известью) гидравлические свойства в романцементе ярко выражены. Начало схватывания романцемента должно наступать не ранее, чем через 15 мин, а конец – не позднее, чем через 24 ч от начала затворения. Следовательно, романцемент имеет большой интервал схватывания и отличается быстро наступающим началом схватывания и замедленным его концом.

Романцемент значительно уступает портуландцементу по прочности. Его марки составляют М25, М50, М100 и М150. Вместе с тем строительные растворы на романцементе отличаются более высокой водостойкостью по сравнению с растворами, приготовленными на гидравлической извести.

В XIX в. романцемент сравнительно широко применялся в строительстве. В настоящее время он так же, как и гидравлическая известь, используется в незначительном количестве. Его можно применять в растворах для каменной кладки наземных и подземных частей сооружений, при изготовлении бетонов низких марок, а также при проведении реставрационных работ.

3. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

3.1. Бетонные и железобетонные изделия

Технология производства самого распространенного на земле строительного материала – бетона, изделий и конструкций на его основе развивается, переживая эволюционные и революционные периоды.

Вяжущие вещества на основе минеральных компонентов использовались с глубокой древности. Применение их на заре цивилизации (хижина с бетонным полом из Лепенски Вира) носило, видимо, случайный характер. Сознательно использовать бетон стали древние египтяне (пирамида в Гизе), за ними античные греки и римляне. Именно римляне превратили бетон в основной строительный

материал. И сегодня одно единственное сооружение является уникальным свидетельством крепости римского бетона – Пантеон (рис. 17), сооруженный в 125 г. н.э. Пантеон – одно из величайших архитектурных сооружений с чудесной колоннадой, украшающей вход в здание, и громадным барабаном, который венчает потрясающий 47-метровый купол. И этот купол сделан из бетона. Пантеон в Риме уже вторую тысячу лет поражает современников своей грандиозностью.



Рис. 17. Пантеон



Рис. 18. Марк Витрувий Полион

Витрувий (рис. 18) в своих «Аналах по архитектуре» описывает применение смеси извести и льняного масла для заделки трещин и швов в кирпичной кладке. Плиний Второй в «Натуральной Истории» сообщает об использовании известковых растворов, затворенных вином, свиным салом и фидами. С повсеместным развитием каменного (кирпичного) строительства смеси на основе минеральных вяжущих веществ начинают широко применяться в строительной практике.

Через двенадцать лет после патента Аспдина появился первый, официально зарегистрированный артефакт из железобетона – лодка Жана Луи Ламбо, адвоката по профессии, с огромным успехом продемонстрированная на Парижской выставке 1855 г. Так начался век железобетона. В этом материале соединены в единое целое стальная арматура и бетон, который частично защищает металл арматуры от коррозии и воспринимает в этом композите сжимающие напряжения, а арматура – растягивающие усилия. Идеи Ламбо, и не только его, были развиты и реализованы в патенты Жозефом Монье. Им был получен патент на железобетон в 1880 г., а сам способ строительства из железобетона долгие годы назывался «Системой Монье».

В 1929 г. публикуется работа Эжена Фрейсине, в которой излагаются основы теории и практики преднапряженного железобетона, а в 1933 г. выходит монография профессора Закавказского института сооружений В. В. Михайлова «Напряженно-армированный бетон». Среди апологетов железобетона, проникнувшихся духом его эстетических и функциональных свойств, можно назвать архитекторов Огюста Пере, Ле Корбюзье (рис. 19, 20), Оскара Нимейера (рис. 21...23), Пьетро Луиджи Нерви (рис. 24...26).



Рис. 19. Французский архитектор и теоретик архитектуры Ле Корбюзье (1887–1965)



Рис. 20. Вилла Савой в Пуасси. Архитектор Ле Корбюзье



Рис. 21. Бразильский архитектор Оскар Нимейер Суарис Филью (р. 1907)



Рис. 22. Кафедральный собор города Бразилиа. Архитектор Оскар Нимейер



Рис. 23. Культурный центр в небольшом испанском городе Авилес (*слева*), народный театр (*справа*). Архитектор Оскар Нимейер



Рис. 24. Пьетро Луиджи Нерви (1891–1979)



Рис. 25. Палаццетто (Малый дворец спорта) в Риме, 1957. Архитектор Пьетро Луиджи Нерви



Рис. 26. Башня Пирелли в Милане (*слева*). Собор Девы Марии в Сан-Франциско (*справа*). Архитектор Пьетро Луиджи Нерви

Пиком популярности железобетона и монолитного бетона можно считать 30...90 годы прошлого века. Прогресс и возрастающие требования к функциональным свойствам строительных материалов сказались и на требованиях к самому бетону. В начале шестидесятых годов технологически получаемая наибольшая прочность бетона составляет 40 МПа, в семидесятых – 50 МПа, в восьмидесятых – 70 МПа, в девяностых – 100...150 МПа. Все больший интерес проявляется к «высокофункциональным бетонам» НРС (High Performance Concrete), к бетонам, ориентированным на предельно высокие собственные характеристики: прочность на сжатие при срезе и изгибе; устойчивость при воздействии химически агрессивных веществ и газов; водонепроницаемость. Венцом стало получение бетона RPC (Reactive Powder Concrete), изготавливаемого из специально подобранных по составу и дисперсности компонентов, прочность которого достигает 800 МПа.

Имеющийся опыт и требования строительства позволяют выделить группу перспективных направлений модификации бетонных смесей и бетонов. Направленные регулирования свойств бетонных смесей и бетонов введем в их состав модификаторов в виде совмещенных водорастворимых или водоразбавляемых продуктов полифункционального многоцелевого назначения на основе поверхностно-активных веществ и электролитов различной природы и механизма действия. Разработка регуляторов процессов схватывания и твердения на основе солей органических кислот и соединений олигомерно-полимерного состава, в том числе ускорителей твердения, не вызывающих коррозии арматуры. Расширения сырьевой базы создания и производства эффективных пластификаторов и суперпластификаторов, в том числе и многофункциональных добавок.

Использование добавок-модификаторов позволяет получать высокопрочные и высококачественные бетоны. Под высокопрочными Международная организация по строительству подразумевает бетоны, имеющие прочность на сжатие 60...130 МПа, а под высококачественными – бетоны с высокими эксплуатационными свойствами при водовяжущем отношении менее 0,4. Подобные бетоны находят все более широкое применение при строительстве в Японии, Норвегии, США, Франции. К неперемным достоинствам таких бетонов относят улучшенную удобоукладываемость, перекачиваемость и прочность. Основные области их применения: высотное строительство, электростанции, морские гидротехнические сооружения, большепролетные мосты и инженерные сооружения, дорожные покрытия (рис. 27).



Рис. 27. Современные бетонные и железобетонные строения

Бетон – это искусственный камень (композит), получаемый в результате затвердевания квалифицированно запроектированной, тщательно перемешанной и в достаточной степени уплотненной бетонной смеси, обеспечивающей ему заданные свойства и состоящей из вяжущего, воды, добавок и заполнителей. Как **композиту** ему можно дать и такое определение: *бетон* – это композиционный материал, образованный объемным сочетанием разнородных по химическому, минералогическому составу, физико-механическим и другим свойствам компонентов с четкой границей раздела между ними, которые имеют прочную механическую (и) или химическую связь.

Бетонная смесь – это бесформенная, многокомпонентная, многофазная, правильно запроектированная и тщательно перемешанная масса, состоящая из вяжущего, заполнителей (наполнителей), воды, вовлеченного воздуха и различных добавок, способная под действием гравитационных сил или (и) внешних воздействий принимать необходимую форму, приобретать заданную плотность, однородность и способная к твердению.

В строительстве широко используются бетоны, приготовленные на цементах или других неорганических вяжущих веществах. Эти бетоны обычно затворяют водой. Цемент и вода являются активными составляющими бетона; в результате реакции между ними образуется цементный камень, скрепляющий зерна заполнителей в единый монолит. Между цементом и заполнителем обычно не происходит химического взаимодействия (за исключением силикатных бетонов, полученных автоклавной обработкой), поэтому заполнители являются инертными материалами.

Однако они существенно влияют на структуру и свойства бетона, изменяя его пористость, сроки затвердевания, поведение при воздействии нагрузки и внешней среды. Заполнители значительно уменьшают деформации бетона при твердении и тем самым обеспечивают получение большеразмерных изделий и конструкций. В качестве заполнителей используются преимущественно местные горные породы и отходы производства (шлаки и др.).

В бетонных смесях цемент занимает 10...15 %, 85...90 % – заполнители и вода. Для регулирования свойств бетона и бетонной смеси в их состав вводят различные химические добавки и активные минеральные компоненты, которые ускоряют или замедляют (по мере необходимости) схватывание бетонной смеси, делают ее более пластичной и удобоукладываемой, ускоряют твердение бетона, повышают его прочность, морозостойкость, регулируют собственные

деформации бетона, возникающие при его твердении, а также при необходимости изменяют и другие свойства бетона.

Бетон относится к композиционным материалам, его структурными элементами являются цементный камень (матрица), зерна заполнителя и контактный слой между ними. Сращивание матрицы и заполнителя, происходящее через контактный слой, обеспечивает структурную целостность бетона и распределение нагрузки между матрицей и заполнителем. Прочность бетона определяют по соответствующим характеристикам структурных элементов. Однако в анализе прочности, проницаемости и долговечности учитывают особенности бетона: наличие разнообразных пор и гелевой составляющей в матрице, изменение структуры и свойств со временем [16].

Бетоны являются капиллярно-пористыми телами, на структуру и свойства которых заметное влияние оказывают как внутренние процессы взаимодействия составляющих бетона, так и воздействие окружающей среды. В течение длительного времени в бетонах происходит изменение пористой структуры, наблюдается протекание структурообразующих, а иногда и деструктивных процессов, и как результат – изменение свойств материала. С увеличением возраста бетона повышается его прочность, плотность, стойкость к воздействию окружающей среды.

3.1.1. Классификация бетонов

В соответствии с ГОСТ 25192 бетоны классифицируются:

1) *по виду вяжущего* – бетоны на цементном, известково-кремнеземистом, гипсовом, шлаковом, гипсошлаковом, шлакощелочном, магнезиальном, полимерном, смешанном, модифицированном и других связующих и специальных вяжущих (кислотостойких, жаростойких, металлических и других);

2) *по виду заполнителя* – бетоны на плотных, пористых и специальных заполнителях (химически стойких, жаростойких и других);

3) *по структуре* – бетоны крупнозернистые, мелкозернистые, тонкодисперсные с плотной, поризованной, крупнопористой и ячеистой структурой;

4) *по условиям твердения* – бетоны естественного твердения, пропаренные и запаренные в автоклаве;

5) *по назначению* – конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные и специальные бетоны (жаростойкие, химически

стойкие, декоративные, теплоизоляционные, радиационно-защитные и другие), бетоны для промышленного и гражданского строительства, гидротехнический и дорожный бетоны и т.д.;

6) *по средней плотности* различают особо тяжелые ($\rho_c = 2500$ (2800)...5000 кг/м³), тяжелые бетоны ($\rho_c = 2001$...2500 (2800) кг/м³), легкие бетоны ($\rho_c = 500$...2000 кг/м³), особо легкие бетоны ($\rho_c < 500$ кг/м³);

7) *по способу уплотнения* бетонной смеси различают вибрированный, самоуплотняющийся и укатываемый бетоны;

8) *по некоторым отличительным качествам* используется рядовой, высококачественный, напрягающийся, модифицированный бетоны, бетон с компенсированной усадкой, фибробетон и т.д.;

9) *по прочности на сжатие и растяжение* бетоны делятся на классы (В и В_т), *по средней плотности, водонепроницаемости и морозостойкости* на марки, соответственно обозначаемые буквами D, W, F.

В перспективе закономерен переход к Евростандарту на бетоны тяжелые и легкие EN 206 «Бетоны – спецификация, эксплуатационные требования, производство, контроль соответствия». Он содержит специальные требования по следующим разделам:

- составляющие бетонной смеси;
- свойства бетонной смеси и бетона;
- спецификация бетонов;
- производственный контроль;
- критерии соответствия и процедуры оценки.

В соответствии с EN 206 тяжелый бетон имеет среднюю плотность 2100...2600 кг/м³, легкий бетон – 800...2100 кг/м³.

К высокопрочным относятся бетоны класса более С67 (85...90 МПа). Стандарт предусматривает максимальный класс тяжелого бетона С115, легкого бетона – С88. В стандарте установлены также требования к материалам, составу, и прочности бетона с целью обеспечения высокой его морозостойкости.

3.1.2. Материалы для бетона

Вязущие материалы. В качестве вязущих используются цементы, строительная известь, гипс и др. Из цементов в основном применяются портландцемент, реже – глиноземистый, расширяющийся и другие цементы. Выбирают цементы в соответствии с заданным классом бетона, с учетом особенностей

технологии изготовления изделий, их назначения и условий эксплуатации. Вяжущие должны соответствовать требованиям:

Цементы общестроительные – ГОСТ 10178 и ГОСТ 31108. ТУ;
 Цементы сульфатостойкие – ГОСТ 22266. ТУ;
 Напрягающийся цемент НЦ10 –ТУ 212613–90;
 Напрягающийся цемент НЦ – ТУ 21–20–18–74;
 Безусадочный цемент – ТУ 212613–90;
 Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые – ГОСТ 969. ТУ;
 Цементы. Общие технические условия – ГОСТ 30515;
 Цемент для дорожных покрытий – ГОСТ 8424. ТУ;
 Цементы. Классификация – ГОСТ 23464;
 Известь строительная – ГОСТ 9179. ТУ;
 Портландцемент цветной – ГОСТ 15825. ТУ;
 Расширяющийся цемент – ГОСТ 11052. ТУ;
 Цементы. Методы испытаний – ГОСТ 30744;
 Портландцементы белые – ГОСТ 965. ТУ;
 Гипс строительный – ГОСТ 23789;
 Гипсовые вяжущие – ГОСТ 125. ТУ.

При производстве бетонов используются: композиционное гипсовое вяжущее КГВ (ТУ 21–53–110–91), ВНВ, ЦНВ, ТМЦ, известково-кремнеземистое вяжущее, шлаковые вяжущие, а также полимерные связующие, жидкое стекло, металлы и др.

Весьма существенному повышению активности цемента и прочности бетона (более чем в 1,5...2 раза) способствует совместный помол клинкера или цемента с сухим суперпластификатором, возможно и с минеральными добавками до удельной поверхности 4,0...5 тыс. см²/г. В качестве добавок можно применять песок, шлак, золу-унос и др. В этом случае получается вяжущее с низкой водопотребностью – ВНВ-100 (50, 30, 20).

Перспективными являются высокопрочные быстротвердеющие цементы (ВПЦ) по ГОСТ 10178 классов 52,5, сверхбыстротвердеющие цементы (СБТЦ), особобыстротвердеющие цементы с крентами (ОБТЦ) и другие эффективные вяжущие.

В XXI в. крайне нужны современные, высококачественные вяжущие полифункционального назначения, в частности модифицированные, со стабильными свойствами, долгохранящиеся, экологически чистые и малоэнергоёмкие цементы с высокими прочностями на сжатие, растяжение и деформативностью, с разными сроками схватывания, скоростями твердения (достигающим требуемой прочности в весьма короткие сроки без тепловлажностной обработки) и областями применения, обеспечивающие получение бетонов,

долговечных в кислотах, щелочах, растворах различных солей, в газах, органических средах, обладающих высокой морозостойкостью и т.д.; с малым содержанием щелочей; безусадочные и с разными энергиями расширения; разных цветов и оттенков [17...19].

Заполнитель составляет основную часть (75...85 %) массы бетона. Он улучшает технические свойства бетона, воспринимает усадочные напряжения, уменьшая в несколько раз усадку бетона по сравнению с усадкой цементного камня. Жесткий остов из заполнителя увеличивает прочность и модуль деформации бетона, уменьшает его ползучесть.

В бетоне используется крупный и мелкий заполнитель. Крупный заполнитель (размер зерен 5...70 мм) подразделяется на щебень и гравий, мелким заполнителем является песок.

Песок – рыхлая смесь зерен крупностью 0,16...5 мм со средней плотностью более 2000 кг/м³. Иногда вместо природного песка применяют искусственный песок, получаемый дроблением горных пород и отсевом указанной фракции продуктов дробления.

Щебень – материал, полученный в результате дробления твердых горных пород на куски размером 5...70 мм.

Гравий – рыхлый материал, образовавшийся в результате естественного разрушения (выветривания) горных пород в виде окатанных зерен тех же размеров, что и зерна щебня.

Заполнители должны соответствовать требованиям:

Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ – ГОСТ 8267. ТУ;

Щебень из природного камня, гравий и щебень для строительных работ – ГОСТ 8269. Методы испытаний;

Песок для строительных работ – ГОСТ 8735. Методы испытаний;

Песок для строительных работ – ГОСТ 8736. ТУ;

Гравий для строительных работ – ГОСТ 8268;

Смесь золошлаковая ТЭС из отвалов совместного гидроудаления золы и шлака – ГОСТ 25592;

Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов – ГОСТ 5578. ТУ.

Химические добавки. Они позволяют эффективно воздействовать на свойства как бетонных смесей, так и бетонов, обеспечивая существенную экономию материальных, трудовых и энергетических затрат [20, 21].

Добавки для регулирования свойств бетонной смеси и бетона (ГОСТ 24211, ГОСТ 30459)

Для улучшения или придания требуемых свойств формовочной смеси и бетона в состав композиции вводят многочисленные добавки.

Добавки, применяемые для модифицирования свойств бетонных и растворных смесей, бетонов и растворов, в зависимости от основного эффекта действия подразделяют на виды:

1. Регулирующие свойства готовых к употреблению бетонных и растворных смесей:

пластифицирующие-водоредуцирующие:

- суперпластифицирующие;
- сильнопластифицирующие;
- пластифицирующие;
- стабилизирующие

регулирующие сохраняемость подвижности;

поризующие:

- воздухововлекающие;
- пенообразующие;
- газообразующие

2. Изменяющие свойства бетонов и растворов:

регулирующие кинетику твердения:

- ускорители;
- замедлители;

повышающие прочность;

снижающие проницаемость;

повышающие защитные свойства по отношению к стальной арматуре;

повышающие морозостойкость;

повышающие сульфатостойкость;

повышающие стойкость против коррозии, вызванной реакцией кремнезема заполнителей со щелочами цемента и добавок;

регулирующие процессы усадки и расширения.

3. Придающие бетонам и растворам специальные свойства:

противоморозные;

гидрофобизирующие;

биоцидные;

повышающие стойкость к высолообразованию.

Эффективность применения добавок определяют по результатам испытаний по ГОСТ 30459 и устанавливают в соответствии с критериями эффективности.

Добавки-наполнители

Их вводят с целью экономии высокоактивного вяжущего. В обычных условиях они не вступают во взаимодействие с минералами цемента, а только замещают часть его зерен, а поэтому активность

цемента, а следовательно, и прочность бетона снижаются пропорционально количеству введенной добавки с такой же поверхностью, как и у вяжущего. К добавкам-наполнителям относятся тонкомолотые песок, известняк, доломит, кварц и др.

Активные гидравлические добавки

Эти добавки вступают в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, в результате чего образуются гидросиликаты кальция. И пока они связываются известью, введение их не снижает прочность бетона. Как только этот процесс прекращается, т.е. количество добавки достигает оптимального значения, дальнейшее увеличение ее количества начинает снижать прочность бетона.

Активные гидравлические добавки бывают естественного (тонкомолотые трепелы, диатомиты, опоки, глиежи, пемзы, пеплы, туфы, трассы и т.д.) и искусственного (тонкомолотые перлит, аглопорит, доменные гранулированные шлаки, золы ТЭС, отходы производства ферросплавов, нефелиновый шлам и др.) происхождения. Среди них есть и спецдобавки – для кислотостойких бетонов (молотые базальт, кварц, диабаз, андезит и др.), для жаростойких бетонов (молотые шамот, хромит, магнезит, перлит, аглопорит) и др.

Пластифицирующие добавки

Это очень обширный класс поверхностно-активных веществ, которые вводятся в формовочную смесь для повышения ее подвижности, снижения водопотребности и вяжущего, повышения плотности, прочности и долговечности бетона, для достижения сразу нескольких результатов. По эффективности все ПАВ разделены на четыре категории (табл.1) [22, 23].

Таблица 1

Классификация пластифицирующих добавок

Категория	Наименование	Эффективность пластифицирующего действия (увеличение осадки конуса ОК в см)	Уменьшение количества воды, %
I	Суперпластификатор	от 2...3 до 20 и более	не менее 20
II	Пластификатор	от 2...3 до 14...20	не менее 10
III	Пластификатор	от 2...3 до 8...14	не менее 5
IV	Пластификатор	от 2..3 до 6...8	менее 5

Добавки-ускорители твердения бетона

Такие добавки ускоряют процесс твердения бетона в ранние сроки (в частности, должны повышать прочность в суточном возрасте не менее чем на 20%): HCl , NaCl , CaCl_2 , FeCl_3 , NaNO_3 , $\text{NHK}[\text{Ca}(\text{NO}_2)_2 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$, $\text{NHXK}[\text{Ca}(\text{NO}_2)_2 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{CaCl}_2]$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, Na_2SO_4 , $\text{NHCH}[\text{NaNO}_2 + \text{NaNO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4]$, K_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Li_2CO_3 и др.

Воздухововлекающие добавки

Их введение способствует вовлечению воздуха в бетонную смесь при ее перемешивании, что повышает подвижность смеси и морозостойкость бетона, снижает среднюю плотность. Представители воздухововлекающих добавок: СНВ, СПД, СДО, ВЛХК, ПАЩ-1, клей талловый пековый (КТП), вспомогательный препарат (ОП) и другие.

Пено- и газообразующие добавки

Они применяются для создания высокопористой структуры ячеистых бетонов (до 90% и более) с целью снижения средней плотности и теплопроводности материала. Газообразователи – это алюминиевая пудра ПАП-1 и ПАП-2, перекись водорода, КОЖ 136-41 (ГКЖ-94), «Газобетолит», «Газобетолукс» и «Газобетопласт» и др. [24]. Они в присутствии щелочи или при взаимодействии с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ выделяют газы: кислород или водород. К пенообразователям относятся сапониновый и канифольный пенообразователи, более эффективные Сампо, ТЭАС, Морпен, Каскад, Поток, ПО-6К, Унипор, Неопор и многие другие. Они снижают поверхностное натяжение воды и способствуют при интенсивном перемешивании раствора пенообразователя образованию стабильной технической пены.

Добавки, повышающие плотность, непроницаемость и долговечность бетона

К ним относятся бентонит, битумная эмульсия (эмульбит), абигат натрия, хлоралюмокальций (ХАК), нитрат кальция и железа, хлорное железо, гидроксид железа, полиамидная смола С-89, сульфат железа, алюминия и аммония, смолы ДЭГ-1, ТЭГ-1 расширяющиеся добавки ИР-1 и др. Механизм их действия различный, но результат один – повышение плотности и непроницаемости материала.

Противоморозные добавки

Противоморозные добавки обеспечивают твердение бетона при отрицательных температурах. К ним относятся: поташ (температура

твердения до -25°C), нитрит натрия (температура твердения до -15°C), $\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$ (до -15°C), нитритнитратхлорид кальция (ННХК до -20°C), нитритнитрат кальция (ННК), формиат натрия и другие.

Добавки-замедлители схватывания и твердения

Для регулирования сроков схватывания вяжущих применяются следующие добавки: гипс, декстрин, сульфитно-дрожжевая бражка, мылонафт, различные ПАВ, замедлитель структурообразования тринатрийфосфат (ТНФ) в сочетании с ПАВ и др.

Добавки-ингибиторы коррозии металлов

Механизм действия этих добавок мало изучен. Есть данные о том, что добавки-ингибиторы связывают, например, хлоридные соединения и таким образом предотвращают коррозию металла. К ним относятся нитрит натрия, нитрит-нитрат кальция, бихромат натрия и калия, соли азотистой кислоты и др.

Добавки, повышающие биостойкость бетона

Эти добавки угнетают жизнедеятельность микроорганизмов: оловоорганический препарат АВП-40, ингибитор КИ-1, сульфат меди, пиросульфат натрия и др.

Добавки, повышающие морозостойкость бетона

Добавки, повышающие морозостойкость бетона, – это вещества, создающие в цементном камне резервный объем мелких, замкнутых пор, что повышает сопротивление бетона попеременному замораживанию и оттаиванию. К ним относятся воздухововлекающие, микропенно- и газообразующие добавки, в том числе и комплексные: СНВ, СДО, СПД-м, НЧК, КОЖ 136-41 (ГКЖ-94), ПАЩ-1, ЩСПК, суперпластификатор + воздухововлекающая добавка, например, МБ-01 + КОЖ 136-41, С-3 + КОЖ 136-41 и др.

Расширяющие добавки

По вещественному составу расширяющие добавки делятся на алюминатно-сульфатные, сульфатно-оксидные и оксидные. Вводятся они для компенсации усадочных деформаций и улучшения свойств бетона. Бетоны с расширяющими добавками имеют более высокую прочность на сжатие и растяжение (на 15...40 %), повышенную трещиностойкость, плотность, водо-, газо- и бензонепроницаемость (W_{12} и выше), более высокую морозостойкость, деформативность, пониженное содержание открытых пор (на 20...25 %).

Конкретным представителем таких добавок является минеральная расширяющая добавка «ИР-1». Добавка может смешиваться с цементом либо непосредственно в бетоносмесителе при приготовлении бетонной смеси, либо вводиться в цемент при его помоле на цементных заводах.

Добавки, повышающие прочность бетона на растяжение и изгиб

Добавки, повышающие прочность бетона на растяжение и изгиб: полимерная смола № 89, ПВА, ДЭГ-1, ТЭГ-1, латексы дивинилстирольные СКС-50, СКС-65, СКС-65ГП и др.

Полимерные материалы для пропитки бетона

Для повышения долговечности бетона целесообразно использовать: полимерные материалы для пропитки бетона, существенно повышающие прочность бетона на сжатие, растяжение, его морозостойкость, стойкость в сульфатной, магниевой, щелочной средах и в слабых кислотах: стирол, метилметакрилат, раствор оксидной смолы в стироле и многие другие.

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

3.1.3. Основные свойства бетона

Свойства бетона определяются не только его составом и качеством исходных материалов, но и технологией изготовления и укладки бетонной смеси в конструкцию, условиями твердения. Все эти факторы учитывают при проектировании состава бетона и производстве конструкций на его основе.

Прочность бетона определяется в основном двумя факторами:

- прочностью затвердевшего цементного камня;
- прочностью его сцепления с заполнителями.

Прочность бетона зависит от активности цемента, водоцементного отношения, качества заполнителей, возраста бетона, степени уплотнения бетонной смеси и условий твердения.

Чем выше активность (марка) цемента, тем при прочих равных условиях будет выше прочность бетона. Зависимость прочности цементного камня от соотношения цемента и воды в бетонной смеси объясняется следующим образом. Цемент при твердении химически связывает не более 20...25 % воды от своей массы, но чтобы

обеспечить необходимую пластичность цементного теста и, соответственно, подвижность бетонной смеси, необходимо брать 40...80 % воды от массы цемента. Вода, кроме того, необходима для смачивания поверхности частиц песка и крупного заполнителя. Естественно, чем больше в бетоне будет свободной, химически не связанной воды, тем больше впоследствии будет пор в цементном камне и, соответственно, ниже станет его прочность.

С другой стороны, если не обеспечить необходимую удобоукладываемость бетонной смеси, то из-за недоуплотнения в структуре бетона появятся крупные пустоты и участки с нарушенной связью «цементный камень – заполнитель», что приведет к резкому снижению прочности бетона. Таким образом, для каждой бетонной смеси существует оптимальное количество воды, которое позволяет получать при данном способе уплотнения бетон с минимальной пористостью и наибольшей прочностью.

Прочность сцепления между цементным камнем и заполнителем определяется в основном качеством поверхности заполнителя. Для обеспечения высокой прочности сцепления поверхность зерен заполнителя должна быть чистой и шероховатой. Например, бетон на щебне при прочих равных условиях прочнее бетона на гравии.

Тяжелый бетон – основной конструкционный строительный материал, поэтому оценке его прочностных свойств уделяется большое внимание. Прочностные характеристики бетона определяют строго в соответствии с требованиями стандартов.

Как и у всех каменных материалов, прочность бетона при сжатии значительно (в 10...15 раз) выше, чем при растяжении и изгибе. Поэтому в строительных конструкциях бетон, как правило, работает на сжатие. Когда говорят о прочности бетона, подразумевают его прочность при сжатии. В остальных случаях оговаривают вид прочности.

Прочность бетона принято оценивать по среднему арифметическому значению результатов испытаний образцов данного бетона через 28 сут нормального твердения. Для этого используют образцы-кубы с длиной ребра 150 мм, изготовленные из рабочей бетонной смеси и твердевшие в стандартных условиях.

Этот основной показатель механических свойств бетона положен в основу деления бетона на марки. Под маркой бетона подразумевается округленное значение прочности в кгс/см² (округление идет в нижнюю сторону). Для тяжелых бетонов установлены марки от М100 до М800.

Бетон относительно низких марок (М100...М200) применяют для конструкций и сооружений с невысокими расчетными напряжениями,

например, для фундаментов и др. Для обычных железобетонных конструкций в промышленном и гражданском строительстве широко используют бетоны марок М200...М300, для предварительно напряженных конструкций М300...М500, в некоторых специальных конструкциях и инженерных сооружениях – М600...М800 и более.

Качество бетона характеризуют также его классом по прочности. Класс бетона – гарантированная прочность бетона с обеспеченностью 0,95. Это значит, что установленная классом прочность бетона, достигается не менее, чем в 95 случаях из 100. Зависимость между классом бетона по прочности и его средней прочностью имеет вид:

$$B = R(1 - tv),$$

где B – класс бетона по прочности, МПа; R – средняя прочность бетона, МПа; t – коэффициент, характеризующий принятую при проектировании обеспеченность класса бетона (обычно 1,64); v – коэффициент вариации прочности бетона.

Понятие «класс бетона» позволяет назначать прочность бетона с учетом ее фактической или возможной вариации. Чем меньше изменчивость прочности, тем больше класс бетона при одной и той же средней прочности. Соотношение между классами бетона и его марками (ГОСТ 26633–91) приведено в табл. 2.

Таблица 2

**Соотношение между марками и классами бетона
по прочности на сжатие и растяжение**

Класс бетона по прочности	Средняя прочность бетона (\bar{R})**, кгс/см ²	Ближайшая марка бетона по прочности М	Отклонение ближайшей марки бетона от средней прочности класса, %, $\frac{M - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100$
1	2	3	4
Сжатие			
V3,5	45,8	M50	+9,2
B5	65,5	M75	+14,5
B7,5	98,2	M100	+1,8
B10	131,0	M150	+14,5
B12,5	163,7	M150	-8,4
B15	196,5	M200	+1,8
B20	261,9	M250	-4,5
B22,5	294,7	M300	+1,8
B25	327,4	M350	+6,9
B27,5	360,2	M350	-2,8
B30	392,9	M400	+1,8
B35	458,4	M450	-1,8
B40	523,9	M550	+5,0
B45	589,4	M600	+1,8

1	2	3	4
B50	654,8	M700	+6,9
B55	720,3	M700	-2,8
B60	785,8	M800	+1,8
B65	851,3	M900	+5,7
B70	916,8	M900	-1,8
B75	982,3	M1000	+1,8
B80	1047,7	M1000	-4,6
Осевое растяжение			
$B_t 0,4$	5,2	$P_t 5$	-3,8
$B_t 0,8$	10,5	$P_t 10$	-4,8
$B_t 1,2$	15,7	$P_t 15$	-4,5
$B_t 1,6$	21,0	$P_t 20$	-4,8
$B_t 2,0$	26,2	$P_t 25$	-4,6
$B_t 2,4$	31,4	$P_t 30$	-4,5
$B_t 2,8$	36,7	$P_t 35$	-4,6
$B_t 3,2$	41,9	$P_t 40$	-4,5
$B_t 3,6$	47,1	$P_t 45$	-4,5
$B_t 4,0$	52,4	$P_t 50$	-4,6
Растяжение при изгибе			
$B_{tb} 0,4$	5,2	$P_{tb} 5$	-3,8
$B_{tb} 0,8$	10,5	$P_{tb} 10$	-4,8
$B_{tb} 1,2$	15,7	$P_{tb} 15$	-4,5
$B_{tb} 1,6$	21,0	$P_{tb} 20$	-4,8
$B_{tb} 2,0$	26,2	$P_{tb} 25$	-4,6
$B_{tb} 2,4$	31,4	$P_{tb} 30$	-4,5
$B_{tb} 2,8$	36,7	$P_{tb} 35$	-4,6
$B_{tb} 3,2$	41,9	$P_{tb} 40$	-4,5
$B_{tb} 3,6$	47,1	$P_{tb} 45$	-4,5
$B_{tb} 4,0$	52,4	$P_{tb} 50$	-4,6
$B_{tb} 4,4$	57,6	$P_{tb} 55$	+4,2
$B_{tb} 4,8$	62,9	$P_{tb} 60$	+3,3
$B_{tb} 5,2$	68,1	$P_{tb} 65$	+2,8
$B_{tb} 5,6$	73,3	$P_{tb} 70$	+2,3
$B_{tb} 6,0$	78,6	$P_{tb} 75$	+1,8
$B_{tb} 6,4$	83,8	$P_{tb} 80$	+1,4
$B_{tb} 6,8$	89,1	$P_{tb} 85$	+1,0
$B_{tb} 7,2$	94,3	$P_{tb} 90$	-4,6
$B_{tb} 8,0$	104,8	$P_{tb} 100$	-4,6

** Средняя прочность бетона R рассчитана при коэффициенте вариации V , равном 13,5 %, и обеспеченности 95 % для всех видов бетонов, а для массивных гидротехнических конструкций при коэффициенте вариации V , равном 17 %, и обеспеченности 90%.

Хорошо сопротивляясь сжатию, бетон значительно хуже противостоит срезу и еще хуже растяжению. В то же время прочность при растяжении и изгибе бетона находится в прямой зависимости от его прочности при сжатии: чем больше прочность при сжатии, тем больше его сопротивляемость растяжению и изгибу.

Кроме названных показателей прочности бетонные изделия характеризуют еще технологической и отпускной прочностью. *Технологической прочностью* бетона называют прочность, при которой можно снять изделие с поддона или формующей установки и транспортировать в пределах завода. Прочность бетона, при которой предприятие может отпускать изделия потребителю в расчете на ее дальнейшее нарастание до проектной, называется *отпускной прочностью*.

При благоприятных температурно-влажностных условиях твердение бетона продолжается многие годы.

Для бетонных и железобетонных конструкций следует предусматривать бетоны следующих классов и марок (СНиП 2.03.01–84):

а) *классов по прочности на сжатие*

тяжелый бетон – B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5; B15; B20; B25; B30; B35; B40; B45; B50; B55; B60;

напрягающий бетон – B20; B25; B30; B35; B40; B45; B50; B55; B60; мелкозернистый бетон групп:

А – естественного твердения или подвергнутый тепловой обработке при атмосферном давлении на песке с модулем крупности свыше 2,0 – B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5; B15; B20; B25; B30; B35; B40;

Б – то же, с модулем крупности 2,0 и менее – B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5; B15; B20; B25; B30;

В – подвергнутый автоклавной обработке – B15; B20; B25; B30; B35; B40; B45; B50; B55; B60;

легкий бетон при марках по средней плотности:

D800, D900 – B2,5; B3,5; B5; B7,5;

D1000, D1100 – B2,5; B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5;

D1200, D1300 – B2,5; B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5; B15;

D1400, D1500 – B3,5; B5; B7,5; B10; B12,5; B15; B20; B25; B30;

D1600, D1700 – B5; B7,5; B10; B12,5; B15; B20; B25; B30; B35;

D1800, D1900 – B10; B12,5; B15; B20; B25; B30; B35; B40;

D2000 – B20; B25; B30; B35; B40;

ячеистый бетон при марках по средней плотности:

автоклавный:

D500 – B1; B1,5;

D600 – B1; B1,5; B2; B2,5;

D700 – B1,5; B2; B2,5; B3,5;

D800 – B2,5; B3,5; B5;

D900 – B3,5; B5 ; B7,5;

неавтоклавный:

–

B1; B1,5;

B1,5; B2; B2,5;

B2; B2,5; B3,5;

B3,5; B5;

D1000 – B5; B7,5; B10;	B5; B7,5;
D1100 – B7,5; B10; B12,5; B15;	B7,5; B10;
D1200 – B10; B12,5; B15;	B10; B12,5;
поризованный бетон при марках по средней плотности:	
D800, D900, D1000 –	B2,5; B3,5; B5; B7,5;
D1100, D1200, D1300 D1400 –	B3,5; B5; B7,5.

Допускается применение бетона промежуточных классов по прочности на сжатие В22,5 и В27,5 при условии, что это приведет к экономии цемента по сравнению с применением бетона соответственно классов В25 и В30 и не снизит другие технико-экономические показатели конструкции;

б) *классов по прочности на осевое растяжение*

тяжелый, напрягающий, мелкозернистый и легкий бетоны – В₁0,8; В₁1,2; В₁1,6; В₂; В₂4; В₂8; В₃2.

Плотность. Плотность бетона является его важнейшим свойством, в значительной степени определяющим прочность, непроницаемость и долговечность бетона. Обычный тяжелый бетон нельзя отнести к плотным материалам. Его пористость колеблется в пределах 5...15 %. Она складывается из пористости цементного камня, крупного заполнителя и пор, возникающих в зоне контакта цементного раствора с заполнителем. Пустоты и трещины в находящемся под нагрузкой хрупком материале действуют как концентраторы растягивающих напряжений, поэтому увеличение пористости вызывает непропорциональное снижение прочности.

Плотность тяжелых бетонов повышают тщательным подбором гранулометрического состава заполнителей, снижением количества воды и интенсивным уплотнением бетонной смеси. С повышением плотности бетона растет не только его прочность, но и водонепроницаемость, морозостойкость и другие свойства. В то же время при получении бетонов с улучшенными теплозащитными свойствами необходимо стремиться к снижению плотности. Общая пористость керамзитобетонов составляет 35...65 %, а ячеистых – 75...85 %.

Деформативность. Бетон под нагрузкой ведет себя не как идеально упругое тело (например, стекло), а как упруго-вязкопластичное тело. При небольших напряжениях (не более 0,2 от предела прочности) бетон деформируется как упругий материал. При этом его начальный модуль упругости зависит от пористости и прочности и составляет для тяжелых бетонов $(2,2...3,5) \cdot 10^4$ МПа (у высокопористых ячеистых бетонов модуль упругости около $1 \cdot 10^4$ МПа).

При больших напряжениях начинает проявляться пластическая (остаточная) деформация, развивающаяся в результате роста микротрещин и пластических деформаций гелевой составляющей цементного камня.

Ползучесть – склонность бетона к росту пластических деформаций при длительном воздействии статической нагрузки. Ползучесть бетона также связана с пластическими свойствами цементного геля и микротрещинообразованием. Она носит затухающий во времени характер. Абсолютные значения ползучести зависят от многих факторов. Особенно активно ползучесть развивается, если бетон нагружается в раннем возрасте. Ползучесть можно оценивать двояко: как положительный процесс, помогающий снижать напряжения, возникающие от термических и усадочных процессов, и как отрицательное явление, например, снижающее эффект от предварительного напряжения арматуры.

Влагоемкость бетона является как положительным, так и отрицательным его свойством. Небольшое количество воды, присутствующее в порах цементного камня (и пористого заполнителя) благоприятствует более полной гидратации цемента, успешному протеканию процесса самозалечивания микротрещин. Однако сильное увлажнение уменьшает прочность и способствует быстрому разрушению бетона при попеременном замораживании и оттаивании.

Действенными средствами уменьшения влагоемкости является объемная и поверхностная гидрофобизация бетона. В необходимых случаях устраивают паро- и гидроизоляцию, препятствующую проникновению влаги в пористый материал.

Паро- и газопроницаемость является важной характеристикой стеновых материалов. Стеновой материал должен обладать определенной величиной проницаемости. Тогда стена будет «дышать», т.е. через наружные стены будет происходить естественная вентиляция, что особенно важно для жилых зданий, в которых отсутствует кондиционирование воздуха.

Следует отметить, что тяжелый бетон обладает низкой паро- и воздухопроницаемостью. Если сравнить эти показатели для керамического кирпича с плотностью 1800 кг/м^3 и бетона с плотностью 2200 кг/м^3 , то у последнего они будут 2,5 раза меньше.

Газопроницаемость уменьшается при повышении плотности за счет снижения капиллярной пористости. Важное значение имеет получение бездефектной структуры бетона, в которой отсутствуют неплотности, вызванные расслоением бетонной смеси. Необходимо соблюдать

хорошие условия твердения бетона, помогающие предотвратить образование микротрещин, в особенности при тепловой обработке.

Водопроницаемость, т.е. способность материала пропускать воду под давлением, имеет большое практическое значение, в особенности для бетонов, применяемых в гидротехнических сооружениях, а также для напорных железобетонных труб. Такие материалы и изделия должны обладать минимальной водопроницаемостью.

На величину водопроницаемости оказывает влияние неоднородность структуры бетона, в частности, наличие капиллярных пор и микротрещин, пронизывающих цементный камень. Водопроницаемость зависит, главным образом, от количества и размеров открытых и сообщающихся друг с другом пор. Бетоны, имеющие в основном тонкие капиллярные поры, практически водонепроницаемы. На водопроницаемость бетона влияют также напор воды, возраст бетона и условия твердения. Плотный бетон при достаточной его толщине практически непроницаем для воды и густых жидкостей (масел, нефти).

Для снижения водопроницаемости необходимо применять заполнители надлежащего качества (с чистой поверхностью), а также использовать специальные уплотняющие добавки (жидкое стекло, хлористое железо). Снижению водопроницаемости способствуют применение расширяющегося цемента (при твердении он залечивает микротрещины), использование поверхностно-активных добавок, добавок-электролитов (хлорида алюминия, алюмината натрия).

Водопоглощение бетона, погруженного в воду, зависит, главным образом, от характера пор – открытые они или условно замкнутые. Уменьшение объема открытых пор, а также предотвращение растрескивания позволяет существенно уменьшить водопоглощение бетона. Для снижения водопоглощения прибегают к гидрофобизации бетона, а также к устройству паро- и гидроизоляции бетонных конструкций. Уменьшение водопоглощения, а также наличие замкнутых воздушных пор способствуют увеличению морозостойкости бетона.

Морозостойкость оценивают числом циклов попеременного замораживания и оттаивания в водонасыщенном состоянии, которое выдерживают бетонные образцы в возрасте 28 сут, без снижения прочности при сжатии более чем на 15 %. Для бетонов установлены марки по морозостойкости: от F50 до F1000. Многократное замораживание и оттаивание приводит к разрушению структуры бетона, появлению трещин и снижению прочности.

Морозостойкость зависит от качества вяжущего и заполнителей и от состава бетона. Большое влияние оказывает характер пористости (чем поры мельче, тем выше морозостойкость), а также величина В/Ц (для морозостойких бетонов она должна быть не более 0,4...0,5).

Морозостойкость бетона может быть повышена введением в бетонную смесь поверхностно-активных веществ, которые уменьшают количество воды затворения и, следовательно, объем открытых пор в затвердевшем бетоне. Одновременно они вовлекают в бетонную смесь воздух, образуя сферические поры, сообщающиеся с капиллярами. Эти поры выполняют роль запасных емкостей, в которые при превращении в лед и расширении выдавливается из капилляров вода. В некоторых случаях производят гидрофобизацию поверхности бетона.

Усадка и набухание. При хранении на воздухе бетоны уменьшаются в объеме, а при хранении в воде набухают. Причина усадки – испарение воды, продолжающееся, пока не установится равновесие между содержанием влаги в бетоне и в окружающей среде. По мере высыхания бетона в его теле возникают значительные силы сжатия, обуславливающие уменьшение его объема. Чем больше воды испаряется, тем больше усадочные деформации. Поскольку заполнитель практически усадке не подвергается, она происходит за счет объемных изменений цементного камня. Усадка цементного камня в бетоне вызывает появление внутренних трещин на контакте с заполнителем и в самом цементном камне, снижающих прочность и морозостойкость бетона.

Для снижения усадочных напряжений, сохранения монолитности и долговечности конструкций стремятся уменьшить усадку бетона. Поскольку наибольшую усадку имеет цементный камень, то введение заполнителя уменьшает количество вяжущего в единице объема материала, при этом образуется своеобразный каркас из зерен заполнителя, препятствующий усадке. Таким образом, рациональное снижение удельного расхода цемента повышает усадочную трещиностойкость бетона. Сооружения большой протяженности разрезаются усадочными швами во избежание появления трещин.

Усадка бетонов различного вида неодинакова. Усадка легких бетонов на пористых заполнителях в среднем на 15...25 % превышает усадку тяжелых бетонов. Еще больше усадка ячеистых бетонов.

При постоянном хранении во влажной среде водосодержание бетона увеличивается, что вызывает набухание цементного камня. При этом также возникают напряжения, но меньшие по значению, чем усадочные.

Теплофизические свойства. Из них важнейшими являются теплопроводность, удельная теплоемкость и температурные деформации.

Удельная теплоемкость бетона изменяется в узких пределах – 0,75...0,92 Дж/(кг·К) и в среднем равна 0,84 Дж/(кг·К). Теплопроводность тяжелого бетона даже в воздушно-сухом состоянии велика – около 1,2...1,5 Вт/(м·К), т.е. в 1,5...2 раза выше, чем у кирпича. Поэтому использовать тяжелые бетоны в ограждающих конструкциях можно только совместно с эффективной теплоизоляцией. Легкие бетоны, в особенности ячеистые, имеют невысокую теплопроводность – 0,1...0,5 Вт/(м·К) и их применение в ограждающих конструкциях предпочтительнее.

Теплопроводность напрямую зависит от пористости, с ростом которой она снижается. Характер пор также оказывает влияние на теплопроводность, и для ее снижения в бетоне стремятся создать мелкие поры, применяя пористые заполнители вместо плотных, или используют метод поризации теста вяжущего. Иногда в бетонных камнях, применяемых для кладки наружных стен, устраивают узкие целевые пустоты. Замена тяжелого бетона легким на пористых заполнителях или ячеистым резко снижает теплопроводность наружных стен и покрытий зданий. Ячеистый бетон с плотностью 250...500 кг/м³ применяют в качестве теплоизоляционного материала.

Еще большее снижение теплопроводности легких бетонов можно получить, применяя стеклообразные пористые заполнители (природную или искусственную пемзу и т.п.). Стеклообразные вещества, как известно, хуже проводят тепло, чем кристаллические.

Теплопроводность бетона резко возрастает при увлажнении (теплопроводность воды в 25 раз больше теплопроводности воздуха), а также с повышением температуры, так как усиливается теплопередача путем лучеиспускания и конвекции. В особенности это заметно при наличии крупных пор, пустот или воздушных прослоек.

Температурные деформации. Температурный коэффициент линейного расширения бетона составляет около $10 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, т.е. при увеличении температуры на 50° расширение достигает примерно 0,5 мм/м. Во избежание растрескивания сооружения большой протяженности разрезают температурно-усадочными швами [16].

Большие колебания температуры (более 80°C) могут вызвать внутреннее растрескивание бетона вследствие различного теплового расширения крупного заполнителя и раствора. Характерные трещины распространяются по поверхности заполнителя, некоторые из них образуются в растворе, а иногда и в слабых зернах заполнителя.

Внутреннее растрескивание можно предотвратить, если позаботиться о подборе составляющих бетона с близкими коэффициентами температурного расширения.

Огнестойкость и жаростойкость. Под огнестойкостью бетонов понимают их стойкость против кратковременного действия огня (например, при пожаре), а под жаростойкостью – стойкость материала при эксплуатации в условиях систематического воздействия повышенных температур.

Бетон – огнестойкий материал. Кратковременное действие огня не снижает прочности конструкции, так как бетон не успевает прогреться. Опасны для бетона термические удары (например, при тушении пожара водой). Вследствие различий коэффициентов термического расширения компонентов бетона разрушается его структура и снижается прочность. Обычные бетоны пригодны для эксплуатации при систематическом нагреве до температуры не более 200°C. Однако при специальном подборе состава бетона его жаростойкость можно повысить.

Трещиностойкость. Трещины различного происхождения портят внешний вид зданий и сооружений, являются очагами коррозии материала, снижают долговечность изделий и конструкций. Трещины в бетоне могут возникнуть еще в процессе начального твердения. В дальнейшем при эксплуатации под воздействием окружающей среды происходит развитие технологических трещин и возникают новые дефекты.

Для предупреждения технологических трещин необходимо проводить пооперационный контроль за изделиями по стадиям производства. Борьба с трещинами помогает определению рационального состава бетона, соблюдение технологического процесса его изготовления, создание оптимальных условий тепловлажностной обработки, обеспечение правильного монтажа изделий, надлежащий уход за бетоном.

Разрушение ограждающих конструкций зданий, например, панелей и блоков наружных стен, обычно начинается с облицовочного слоя. Он растрескивается и может отслаиваться из-за значительных температурных и влажностных градиентов. Природе цементных материалов свойственны значительные деформации, происходящие при твердении. Процесс твердения цементной составляющей длится, при благоприятных условиях, многие годы, поэтому и деформации, сопровождающие этот процесс, проходят долго.

Наиболее часто бетонные конструкции подвержены влажностным деформациям. В процессе эксплуатации влажностные деформации

цементных бетонов изменяются многократно не только в течение годовых сезонов, но иногда и в течение суток: увлажнение бетона дождем, туманом многократно чередуется с процессами высыхания. Это приводит к значительным деформациям (усадка-набухание), расшатывающим структуру материала.

Особенно неблагоприятно влажностные деформации сказываются на материалах, изготовленных на цементе высокой тонкости помола (на основе высокопрочного и быстротвердеющего цементов). Кроме того, повышенные расходы цемента и воды затворения также способствуют увеличению деформаций твердеющей бетонной системы.

Причиной появления трещин могут явиться и температурные деформации, о которых было сказано выше. Архитектор, конструктор и технолог обязаны учесть разнородность деформаций материалов, обеспечить рациональные условия их службы в зданиях и сооружениях и предусмотреть мероприятия, регулирующие их совместную работу. Одним из важнейших условий, повышающих трещиностойкость бетона как на стадии изготовления, так и его последующей эксплуатации, является повышение прочности при растяжении бетона, в первую очередь, его предельной растяжимости – $\varepsilon_{\text{пред}}$. Трещин не произойдет, если $\varepsilon_{\text{пред}} \geq R_{\text{раст}}/E$, где E – модуль упругости бетона [15].

Установлено, что легкие бетоны на пористых заполнителях, имеющие повышенную предельную растяжимость, лучше противостоят растрескиванию, чем тяжелые бетоны. Помимо растрескивания цементных бетонов под действием описанных причин происходит нарушение их монолитности из-за конгломератного строения самого бетона.

Кроме того, на монолитность конгломератного строения оказывает влияние качество контактной зоны между заполнителем и цементным камнем. Оно весьма благоприятно проявляется при пористом легком заполнителе. Это объясняется специфическими свойствами пористого заполнителя в бетоне: повышенным сцеплением зерен с цементным камнем, наличием упрочненных контактных слоев, обеспечивающих повышенную прочность цементного камня при растяжении и изгибе. Поэтому возможность внутреннего растрескивания легких бетонов меньше, чем обычных тяжелых бетонов.

Таким образом, только в совокупности, начиная с процесса изготовления бетона и учитывая условия рациональной его эксплуатации, возможно уменьшение растрескивания и повышение

трещиностойкости бетонных и железобетонных изделий и монолитных конструкций.

3.1.4. Особенности технологии производства бетона, пути экономии цемента и повышения эффективности бетонов

Технология производства бетона сводится к следующим операциям: приготовление бетонной смеси, ее заливка в форму-опалубку, уплотнение и твердение.

Самым слабым по прочности и самым дорогим по стоимости компонентом бетона является цемент. Рациональное снижение расхода цемента удешевляет бетон и улучшает его свойства: уменьшается усадка бетона, а его трещиностойкость повышается. Недопустимы большие расходы цемента в бетоне для массивных сооружений в связи с большим тепловыделением, вызывающим неравномерный разогрев бетона и его растрескивание. Расход цемента зависит от соотношения марок цемента и бетона, качества заполнителей и количества воды затворения.

Рациональный расход цемента в бетонах обеспечивается, когда марка цемента примерно в 1,5...2 раза превосходит марку бетона. В частности, для бетонов марок 400...500 требуются цементы марок 500...600. При высоких марках бетона повышение прочности цемента на одну марку, при прочих равных условиях, позволяет экономить около 15 % цемента. Такой подход наиболее целесообразен при использовании в бетонах быстротвердеющего и особо быстротвердеющего цементов. Несмотря на их высокую стоимость, это обеспечит снижение расхода вяжущего, сокращение продолжительности тепловлажностной обработки, затраты металла на формы для железобетонных изделий, снижение себестоимости изделий.

Качество заполнителей оказывает очень большое влияние на расход цемента в бетоне. Применение промытого и фракционированного крупного заполнителя дает экономию цемента около 14 %. Положительный эффект также дает использование мелкого заполнителя (песка), отмытого от глинистых и илистых примесей.

Ощутимый эффект дает снижение воды затворения при приготовлении бетонной смеси. Пластифицирующие добавки, а также гидрофобный и пластифицированный цементы снижают расход воды и цемента на 8...12 %, не ухудшая удобоукладываемости бетонной смеси. К росту прочности бетона или снижению содержания в нем

цемента приводит обеспечение рациональных условий твердения, применение тепловлажностной обработки и надлежащий уход за бетоном.

В современном строительстве бетон применяется в объеме, большем, чем любой другой строительный материал. Повышение эффективности бетонов заключается в расширении сырьевой базы их производства, в частности, использование промышленных отходов, что особенно важно не только с точки зрения их удешевления, но и экологии. Повышение эффективности бетонов заключается также в снижении их массы, увеличении прочности и долговечности.

Комплексное и значительное улучшение физико-механических свойств и долговечности бетона достигается путем пропитки бетона полимерными материалами (метилметакрилатом, стиролом) с последующей полимеризацией его в порах бетона. Бетон пропитывают под вакуумом, затем высушивают и специально обрабатывают с целью ускорения полимеризации мономера: подвергают радиационному воздействию, либо термической обработке. Подобная обработка приводит к повышению прочности при сжатии в 2...4 раза, снижению истираемости на 50...80 %; вследствие повышения плотности бетона сильно снижается водопроницаемость (примерно в 7 раз), морозостойкость возрастает в несколько раз.

Таким образом, полимерная пропитка дает возможность получить качественно новый материал с высокой прочностью и долговечностью. Добавка полимеров в виде эмульсий позволяет регулировать деформативные свойства бетона. Полимерные покрытия железобетонных конструкций из кремнийорганических, эпоксидных, полиэфирных и других смол повышают водостойкость и трещиностойкость бетона.

3.1.5. Тяжелые бетоны

При производстве тяжелых бетонов применяют портландцемент и его разновидности, а также глиноземистый цемент и другие виды вяжущих. Тяжелые бетоны имеют плотность от 1800 до 2500 кг/м³. Цемент выбирают на основе полного учета требований, предъявляемых к бетону (в отношении прочности, морозостойкости, специальных свойств). Учитывают также особенности конструкции и сооружения, а также условия изготовления железобетонных конструкций.

Для изготовления бетонов, противостоящих сульфатной коррозии, рекомендуется применять сульфатостойкий портландцемент. В

бетонах с повышенной морозостойкостью нельзя использовать смешанные цементы, содержащие минеральные добавки (в том числе пуццолановый и шлаковый портландцементы). Для повышения морозостойкости бетона следует применять гидрофобный, пластифицированный и сульфатостойкий портландцементы.

Мелким заполнителем в тяжелом бетоне служит природный и дробленый песок, состоящий из зерен размером 0,16...5 мм и имеющий насыпную плотность более 1200 кг/м³. Как правило, применяют крупные пески с модулем крупности более 2,5 и средней крупности с модулем 2...2,5.

Крупный заполнитель (щебень, гравий) состоит из зерен размером от 5 до 70 мм. Его различают по фракциям, мм: 5...10, 10...20, 20...40, 40...70. При изготовлении бетонной смеси фракции дозируют в соотношениях, необходимых для получения минимальной пустотности заполнителя, что позволяет снижать расход вяжущего при сохранении заданных свойств бетона. Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы ограничивается 15 %. Нельзя применять заполнитель, в котором глина находится в виде пленки, обволакивающей зерна заполнителя, или в виде комьев. Заполнитель очищают от примесей глины и пыли промывкой.

Марка крупного заполнителя, определяемая по дробимости при сжатии в цилиндре, должна быть выше марки бетона не менее, чем в 1,5...2 раза; при менее прочном заполнителе перерасходуется цемент.

Тяжелый бетон является основным видом бетона для железобетонных конструкций, обладающим рядом ценных свойств. Основные его свойства (прочность, морозостойкость и др.) можно изменять в широком диапазоне [25].

Прочность бетона в проектном возрасте характеризуют классами прочности на сжатие, осевое растяжение, растяжение при изгибе.

Для бетонов установлены следующие классы:

– по прочности на сжатие: В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60; В65; В70; В75; В80.

Допускается применение бетона промежуточных классов по прочности на сжатие В22,5 и В27,5.

– по прочности на осевое растяжение: В_о0,4; В_о0,8; В_о1,2; В_о1,6; В_о2,0; В_о2,4; В_о2,8; В_о3,2; В_о3,6; В_о4,0;

– по прочности на растяжение при изгибе: В_и0,4; В_и0,8; В_и1,2; В_и1,6; В_и2,0; В_и2,4; В_и2,8; В_и3,2; В_и3,6; В_и4,0; В_и4,4; В_и4,8; В_и5,2; В_и5,6; В_и6,0; В_и6,4; В_и6,8; В_и7,2; В_и8,0.

При нормировании прочности по маркам установлены следующие марки:

– по прочности на сжатие: M50; M75; M100; M150; M200; M250; M300; M350; M400; M450; M500; M550; M600; M700; M800; M900; M1000;

– по прочности на осевое растяжение: R_{t5} ; R_{t10} ; R_{t15} ; R_{t20} ; R_{t25} ; R_{t30} ; R_{t35} ; R_{t40} ; R_{t45} ; R_{t50} ;

– по прочности на растяжение при изгибе: R_{tb5} ; R_{tb10} ; R_{tb15} ; R_{tb20} ; R_{tb25} ; R_{tb30} ; R_{tb35} ; R_{tb40} ; R_{tb45} ; R_{tb50} ; R_{tb55} ; R_{tb60} ; R_{tb65} ; R_{tb70} ; R_{tb75} ; R_{tb80} ; R_{tb85} ; R_{tb90} ; R_{tb100} .

Марки тяжелого бетона по прочности, кгс/см²: M100, M150, M200, M300, M400, M500, M600, M800. Средние марки бетона (150...300) применяют для обычных железобетонных конструкций, а бетон высоких марок (400...600) нужен для предварительно напряженных конструкций. При этом надо учесть, что бетон на плотном заполнителе имеет меньшую усадку и ползучесть по сравнению с легким бетоном на пористом заполнителе и ячеистым бетоном. Поэтому и потери предварительного напряжения арматуры при тяжелом бетоне меньше. Кроме того, он хорошо защищает стальную арматуру от коррозии, что особо важно для предварительно напряженных конструкций.

Для бетонных конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации попеременному замораживанию и оттаиванию, назначают следующие марки бетона по морозостойкости: F50; F75; F100; F150; F200; F300; F400; F500; F600; F800; F1000.

Для бетонных конструкций, к которым предъявляются требования ограничения проницаемости или повышенной плотности и коррозионной стойкости, назначают марки по водонепроницаемости. Установлены следующие марки по водонепроницаемости: W2; W4; W6; W8; W10; W12; W14; W16; W18; W20.

У тяжелого бетона более благоприятные показатели поверхностного износа, что важно для цементно-бетонных дорог и полов промышленных зданий. У него хорошие защитные свойства против радиоактивных излучений, поэтому он широко применяется в конструкциях биологической защиты атомных реакторов.

Тяжелый бетон весьма теплопроводен: теплопроводность составляет в среднем 1,18 Вт/(м·К), т.е. в 2...3 раза выше, чем у легких бетонов, поэтому в наружных стенах и покрытиях зданий его применяют совместно с теплоизоляцией [7].

Масса несущих железобетонных конструкций большого пролета в 4...6 раз превышает массу металлических и деревянных конструкций того же типа. Бетон хранит свое значение главного строительного материала, поэтому главной задачей является снижение массы бетона и железобетонных конструкций.

Снизить массу несущих железобетонных конструкций можно, применяя высокопрочные бетоны марок М700 и выше, позволяющие уменьшить размер сечения и объем бетона в конструкции на 20...25 %. Для большинства же железобетонных конструкций, включая стены и покрытия зданий, основной путь снижения массы – применение легких бетонов на пористых заполнителях, и ячеистых бетонов.

3.1.6. Легкие бетоны на пористых заполнителях

Это наиболее распространенный вид легких бетонов. Свидетельства их применения известны еще в Древнем Риме. Для их получения тогда использовался природный заполнитель – пемза и туф, а также бой керамики. В настоящее время эти заполнители также используются как местный материал.

Широкое развитие легкие бетоны получили во второй половине XX в., когда началось массовое производство искусственных пористых заполнителей: керамзита, аглопорита, шлаковой пемзы и др.

Легкие бетоны имеют плотность менее 1800 кг/м³. Их изготавливают на основе быстротвердеющего и обычного портландцементов, а также шлакопортландцемента. Применяют в основном неорганические пористые заполнители. Последние отличаются большим разнообразием. Они бывают природного и искусственного происхождения.

Природные получают путем дробления и фракционирования пористых горных пород (пемзы, вулканических и известковых туфов и т.п.). Это самые дешевые заполнители, получаемые без участия термообработки. Искусственные пористые заполнители изготавливают путем обжига вспучивающихся горных пород (керамзит (рис. 28), вспученный перлит (рис. 29), вермикулит (рис. 30), аглопорит (рис. 31), шлаковая пемза (рис. 32)).

Керамзит (керамзитовый гравий) получают путем обжига гранул, приготовленных из вспучивающихся глин. Это легкий и прочный заполнитель (насыпная плотность от 250 до 800 кг/м³). В процессе обжига легкоплавкая глина вспучивается вследствие выделения внутри каждой гранулы газообразных продуктов. В изломе гранула керамзита имеет структуру застывшей пены. Спекшаяся оболочка, покрывающая гранулу, придает ей высокую прочность. Керамзитовые зерна размером до 5 мм называют *керамзитовым песком*.

Вспученный перлит изготавливают путем обжига водосодержащих вулканических стеклообразных пород (перлитов, обсидианов). При обжиге вода выделяется, и перлит увеличивается в объеме в 10...20 раз.

Вспученный вермикулит – пористый сыпучий материал, полученный путем термической обработки водосодержащих слюд. Этот наполнитель, как и вспученный перлит, используют для изготовления теплоизоляционных легких бетонов.

Аглопорит получают при обжиге глиносодержащего сырья с добавкой 8...10 % твердого топлива на решетках специальных агломерационных машин. Каменный уголь выгорает, а частицы сырья спекаются.

Шлаковая пемза образуется путем быстрого охлаждения расплава металлургических шлаков, приводящего к вспучиванию. Куски шлаковой пемзы дробят и рассеивают, получая пористый щебень.



Рис. 28. Керамзитовый гравий и песок



Рис. 29. Вспученный перлит



Рис. 30. Вспученный вермикулит



Рис. 31. Аглопорит



Рис. 32. Шлаковая пемза

Прочность легких пористых заполнителей невелика, обычно ниже прочности цементного раствора. Однако хорошее сцепление между ним и зернами пористого заполнителя (эффект «цементной обоймы») обеспечивает высокую прочность бетона в целом.

Пористые заполнители обладают значительным водопоглощением и при затворении бетонной смеси отсасывают часть воды. Поэтому по сравнению с тяжелым бетоном равноподвижные легкобетонные смеси требуют увеличения расхода воды. При этом в легком бетоне отчетливо проявляется вредное влияние как недостатка, так и избытка воды. Благодаря тому, что часть воды затворения аккумулируется пористым заполнителем, а затем отдается цементу по мере твердения бетона, твердение легких бетонов в меньшей мере зависит от влажностных условий, а усадочные деформации в цементном камне имеют меньшую величину. В результате легкие бетоны на пористых заполнителях обладают высокой однородностью структуры и малой проницаемостью, что обеспечивает высокую прочность (10...40 МПа и более) и долговечность конструкций и сооружений.

Легкие бетоны среди всех видов бетонов отличаются своей универсальностью. Применяя различные виды пористого заполнителя и используя технологические приемы, получают бетоны различного назначения: теплоизоляционные – с плотностью не более 500 кг/м³; конструкционно-теплоизоляционные, предназначенные для ограждающих конструкций – стен и покрытий зданий, имеющие плотность в пределах 500...1400 кг/м³, марки по прочности 35...100; конструкционные, со значениями плотности 1400...1800 кг/м³, марочной прочности 150...500 и морозостойкости 100...300 циклов.

Качество легкого бетона определяется показателями двух самых важных его свойств: проектной маркой по прочности при сжатии и величиной плотности. Плотность легкого бетона зависит, главным образом, от плотности пористого заполнителя. Наивыгоднейшее сочетание показателей плотности, теплопроводности и расхода цемента достигается при наибольшем насыщении бетона пористым заполнителем. При этом снижается расход цемента и уменьшается содержание цементного камня, являющегося самой тяжелой составной частью легкого бетона. Марки легкого бетона по плотности в сухом состоянии изменяются от D200 до D2000, кг/м³.

С повышением плотности бетона снижается его пористость, при этом возрастает прочность, но вместе с тем увеличивается и теплопроводность. Установлены следующие проектные марки легких бетонов по прочности: M25, M35, M50, M75, M100, M150, M200, M250, M300, M400 и M500. Коэффициент конструктивного качества

легких бетонов выше, чем у тяжелых примерно в 1,4 раза при одинаковой прочности, плотность конструкционных легких бетонов на 600...700 кг/м³ меньше, чем у тяжелых. Легкие бетоны обладают более высокой трещиностойкостью, так как их предельная растяжимость в 2...4 раза выше, чем равнопрочных тяжелых бетонов. Кроме того, легкие бетоны на пористых заполнителях эффективнее тяжелых бетонов по показателю приведенных затрат: в наружных стенах – на 12...25 %, во внутренних несущих стенах – на 8...14 % [7].

В силу этого конструктивный легкий бетон особенно выгодно применять взамен тяжелого в железобетонных конструкциях больших пролетов (фермы, пролетные строения мостов и т.п.), где особенно эффективно снижение собственной массы конструкции. Уменьшение нагрузок от собственной массы позволяет сократить расход арматурной стали на 15...30 %.

Деформативные свойства легких и тяжелых бетонов сильно различаются. Легкие бетоны на пористых заполнителях, как уже отмечалось, более трещиностойки. Однако следует учитывать и такие особенности легких бетонов, как большие усадка и ползучесть по сравнению с тяжелыми бетонами.

Теплопроводность легких бетонов зависит от плотности и влажности и составляет в диапазоне плотностей 600...1800 кг/м³ 0,2...0,7 Вт/(м·К). В зависимости от плотности и теплопроводности толщина наружной стены из легкого бетона может быть от 22 до 50 см.

Долговечность бетона зависит от его морозостойкости. Для ограждающих конструкций обычно применяют легкий бетон, выдерживающий 15...35 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Однако для стен влажных промышленных помещений, в особенности в районах с суровым климатом, требуется более морозостойкий легкий бетон. Требования по морозостойкости еще больше повышаются, если конструктивный легкий бетон предназначен для гидротехнических сооружений, мостовых и других конструкций. В этих случаях нужен легкий бетон с марками по морозостойкости F50, F100, F200.

Для морозостойких легких бетонов рекомендуется применять портландцемент ПЦ500 и ПЦ600. В качестве крупного заполнителя предпочтителен керамзитовый гравий. Его важной характеристикой являются «резервные» поры, не заполняемые водой при обычных условиях. Чем больше объем резервных пор, тем выше морозостойкость керамзита. Вода, насыщающая зерна керамзита, при замерзании расширяется и отжимается в резервные (свободные от воды) поры, не причиняя вреда самому материалу. Морозостойкость

легкого бетона сильно повышается, если в качестве мелкого заполнителя применяют обжиговый керамзитовый песок.

Морозостойкость зависит не только от качества цемента и заполнителей, но и от строения бетона. Оно должно быть слитным, при этом цементного теста должно хватить на образование вокруг зерен пористого заполнителя оболочек, которые уменьшают водопоглощение пористого заполнителя в бетоне и повышают стойкость бетона. Созданию оптимальной структуры и повышению морозостойкости легкого бетона способствует подбор оптимального расхода воды, а также применение гидрофобизирующих добавок. Морозостойкость возрастает при введении в бетонную смесь добавок кремнийорганических жидкостей, а также воздухововлекающих добавок (абиегата натрия, канифоливого мыла).

Возможность получения легких бетонов с высокой морозостойкостью и малой водопроницаемостью значительно расширяет области их применения. Бетоны на пористых заполнителях успешно используются в мостостроении, в гидротехническом строительстве и даже судостроении.

Легкий бетон для несущих армированных конструкций должен быть плотным, т.е. иметь слитную структуру, при которой межзерновые пустоты крупного заполнителя были бы полностью заполнены цементным раствором. В таком плотном легком бетоне защита арматуры от коррозии не нужна.

Водостойкость плотных легких бетонов существенно не отличается от водостойкости тяжелых бетонов. Обычно уменьшение прочности легких бетонов от их кратковременного насыщения водой не превышает 15 %. В воде легкий бетон набухает больше, чем равнопрочный тяжелый бетон. Водонепроницаемость конструкционного легкого бетона высокая. Керамзитобетон с расходом цемента 300...350 кг/м³ не пропускает воду даже при давлении 2 МПа. Характерно, что водонепроницаемость легкого бетона со временем повышается.

Разновидностью легких бетонов являются *крупнопористые (беспесчаные)* бетоны – в них не содержится песок, и сохраняются крупные межзерновые пустоты. Благодаря отсутствию песка и пониженному расходу цемента, используемого лишь для склеивания зерен крупного заполнителя, плотность крупнопористого бетона на 600...700 кг/м³ ниже, чем у аналогичного бетона плотного строения.

Эти бетоны могут выполнять как конструктивно-теплоизоляционные функции (при значениях плотности 500...1400 кг/м³), так и сугубо теплоизоляционные (при плотности

менее 500 кг/м^3). Необходимо учитывать, что крупнопористые бетоны характеризуются высокой проницаемостью и требуют защиты от воздействий внешней среды. Поэтому их целесообразно применять, например, в качестве внутреннего теплоизоляционного слоя слоистых ограждающих конструкций и в других аналогичных случаях.

Крупнопористые бетоны целесообразно изготавливать на основе пористых заполнителей (керамзита, шлаковой пемзы и др.). В этом случае плотность бетона составляет $500 \dots 700 \text{ кг/м}^3$ и плиты из такого бетона эффективны для теплоизоляции стен и покрытий зданий. Объемы использования крупнопористого бетона незначительны.

Легкие бетоны на пористых заполнителях применяются для изготовления различных строительных элементов зданий и сооружений: панелей для стен и перекрытий отапливаемых зданий, пролетных строений мостов, ферм, плавучих средств. Применение изделий из легких бетонов позволяет укрупнить монтажные элементы, уменьшить общую массу сооружения, улучшить качество строительства и повысить производительность труда. При уменьшении массы бетона на каждые 10 % стоимость конструкции снижается примерно на 3 %. Применение легких бетонов дает возможность на 30...40 % снизить массу зданий, на 20 % сократить трудоемкость их возведения, на 30...40 % уменьшить транспортные расходы, не менее, чем на 6...10 % снизить общую стоимость строительства.

3.1.7. Ячеистые бетоны

Ячеистые бетоны являются разновидностью легких бетонов, их получают в результате затвердевания вспученной при помощи порообразователя смеси вяжущего, кремнеземистого компонента и воды. При вспучивании исходной смеси образуется характерная «ячеистая» структура бетона с равномерно распределенными по объему воздушными порами. Общая пористость ячеистых бетонов составляет 60...85 %. Сферические поры (ячейки) диаметром 0,5... 2 мм, равномерно распределенные в теле бетона, разделены тонкими и прочными перегородками (мембранами) из отвердевшего вяжущего вещества, образующими несущий каркас материала. Благодаря этому ячеистые бетоны имеют небольшую плотность, малую теплопроводность и достаточную прочность. Эти свойства, доступность сырья и простота технологии делают ячеистый бетон прогрессивным материалом для эффективных конструкций стен, покрытий зданий из легкого железобетона.

Идея получения поризованных бетонов принадлежит пражскому инженеру Гофману, получившему в 1889 г. патент на изготовление бетонов, пористая структура которых образовывалась за счет выделения CO_2 при реакции HCl и NaHCO_3 .

Ячеистые бетоны классифицируются по различным признакам:

1) *по способу формирования структуры* – газобетоны, пенобетоны и газопенобетоны;

2) *по виду вяжущего* – на основе цемента, известково-кремнеземистого вяжущего, смешанных вяжущих, гипса или композиционного гипсового вяжущего, шлаковых цементов (шлакощелочной, известково-шлаковый) и других;

3) *по способу твердения* – неавтоклавные (естественное твердение, пропарка, электропрогрев и т.д.) и автоклавные;

4) *по виду кремнеземистого компонента* – на природных кремнеземистых компонентах (песок, трепел, диатомит, опока и других) и искусственных кремнеземистых компонентах – отходах производств (зола-унос, зола гидроудаления, шлаки, тонкодисперсные вторичные продукты обогащения руд, ферросилиций и др.);

5) *по назначению* – теплоизоляционные, конструкционно-теплоизоляционные и конструкционные, жаростойкие, декоративные и акустические ячеистые бетоны;

6) *по прочности на сжатие* ячеистые бетоны делятся на классы В0,5...В15;

7) *по средней плотности* ячеистые бетоны классифицируются на марки – D300...D1200. Возможно получение и более легких ячеистых бетонов до D75;

8) *по морозостойкости* ячеистые бетоны делятся на марки – F15...F100;

Плотность ячеистых бетонов сравнительно легко регулировать в процессе изготовления и получать бетоны различной плотности и назначения. По назначению ячеистые бетоны подразделяются на три группы: теплоизоляционные, плотностью в высушенном состоянии не более 500 кг/м^3 ; конструкционно-теплоизоляционные (для ограждающих конструкций), плотностью от 500 до 900 кг/м^3 ; конструкционные (для железобетона), плотностью от 900 до 1200 кг/м^3 . Кроме того, в последнее время появились ультралегковесные поробетоны с пониженной плотностью от 150 до 300 кг/м^3 [17].

Вяжущим материалом для цементных ячеистых бетонов обычно служит портландцемент. Бесцементные ячеистые бетоны (газо- и пеносиликат) автоклавного твердения изготавливают, применяя

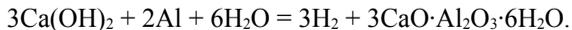
известково-песчаное вяжущее. Совместно с вяжущим применяют кремнеземистый компонент (молотый кварцевый песок, золу-унос ТЭС и молотый гранулированный доменный шлак), уменьшающий расход вяжущего и повышающий качества ячеистого бетона. В ячеистом бетоне заполнителем по существу является воздух, находящийся в искусственно созданных ячейках.

Кварцевый песок размалывают обычно мокрым способом и применяют в виде песчаного шлама. Измельчение увеличивает удельную поверхность кремнеземистого компонента и повышает его химическую активность. Применение отходов промышленности (золы-унос и доменных шлаков) для изготовления ячеистого бетона является экономически выгодным, так как при этом утилизируются промышленные отходы и удешевляется сам материал.

Соотношение между кремнеземистым компонентом и вяжущим устанавливают опытным путем. Кремнеземистый компонент и портландцемент обычно берут поровну (соотношение 1:1). При перемешивании материалов в смесителе получают исходную смесь – тесто, состоящее из вяжущего, кремнеземистого компонента и воды. Вспучивание теста может осуществляться двумя способами: *химическим*, когда в тесто вводят газообразующую добавку и в смеси происходит химическая реакция, сопровождающаяся выделением газа; *механическим*, заключающимся в том, что тесто смешивают с отдельно приготовленной устойчивой пеной.

Для создания высокопористой структуры ячеистых бетонов применяются следующие способы: газообразования; пенообразования; аэрации и сухой минерализации пены; способ насыщения формовочной массы воздухом под давлением; вибровакuumный и комбинированные способы [26, 27].

Газобетон и газосиликат. Газобетон приготавливают из смеси портландцемента, кремнеземистого компонента и газообразователя. В роли последнего обычно выступает алюминиевая пудра или перекись водорода, но чаще все же используют алюминиевую пудру или пасту, которая реагирует с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяя водород по реакции:



Объем выделяющегося газа зависит от активности алюминиевой пудры (пасты) и температуры воды затворения. На 1 м^3 ячеистого бетона расходуется около 0,5 кг алюминиевой пудры.

Ячеистый бетон изготавливают по *литьевой* (обычной) технологии и другими методами. Литьевая технология предусматривает отливку изделий, как правило, в отдельных формах из текучих смесей,

содержащих до 50...60 % воды от массы сухих компонентов ($V/T = 0,5...0,6$). Приготовленная при смешивании предварительно измельченных компонентов: вяжущего, водно-песчаного шлама и суспензии алюминиевой пудры подвижная вязко-текучая масса заливается в металлические формы на определенную высоту с таким расчетом, чтобы после вспучивания формы были заполнены ячеистой массой. После схватывания смеси (или «созревания») массив разрезают с помощью струн специальной резательной машины на отдельные блоки определенных размеров. Далее полученные блоки загружают в автоклав, где они проходят гидротермальную обработку при температуре 175...183°C и давлении пара 0,8...1,0 МПа. В среде насыщенного водяного пара кремнеземистый компонент проявляет химическую активность и вступает в соединение с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что в итоге обеспечивает ячеистому бетону повышенную прочность и морозостойкость. Время выдержки изделий в автоклаве при максимальной температуре составляет 5...8 ч.

Безавтоклавные ячеистые бетоны, изготовленные по литьевой технологии и твердеющие в условиях тепловлажностной обработки (пропаривание при температуре 80...100°C и атмосферном давлении), значительно уступают автоклавным бетонам по прочности и морозостойкости.

Литьевая технология ячеистого бетона, основанная на применении текучих смесей с большим количеством воды, имеет ряд недостатков. Готовые изделия имеют повышенную влажность – 25...30 %, поэтому у них большая усадка, вызывающая появление трещин. Изделия получаются неоднородными по толщине (высоте формы) вследствие расслоения жидких смесей, всплывания газовых пузырьков. Из-за медленного газовыделения удлиняется производственный цикл и структура самого изделия становится неоднородной.

Другой способ – *вибрационный* заключается в том, что во время перемешивания в смесителе и вспучивания в форме смесь подвергается вибрации. Тиксотропное разжижение, происходящее вследствие ослабления связей между частицами, позволяет уменьшить количество воды затворения на 25...30 % без ухудшения удобоформуемости смеси. В смеси, подвергнувшейся вибрированию, ускоряется газовыделение – вспучивание заканчивается в течение 5...7 мин вместо 15...50 мин при литьевой технологии. V/T при вибрационной технологии значительно меньше, чем при литьевой, поэтому уменьшается крупная пористость, и возрастает плотность перегородок между порами. Это способствует повышению прочности и морозостойкости ячеистого бетона.

Вибрационная технология позволяет сократить время доавтоклавной выдержки (созревания) массива и продолжительность самой автоклавной обработки. Структура ячеистого бетона получается более однородной, с пониженной влажностью и повышенной трещиностойкостью.

Газосиликат является разновидностью газобетона. Он изготавливается на основе известково-песчаного вяжущего (без цемента). Изделия из газосиликата приобретают нужную прочность и морозостойкость только после автоклавной обработки, обеспечивающей химическое взаимодействие между известью и кремнеземистым компонентом и образование нерастворимых в воде гидросиликатов кальция.

Пенобетон и пеносиликат. Пенобетонную смесь приготавливают, смешивая между собой раздельно приготовленные растворную смесь и пену, образующую в тесте воздушные ячейки. Раствор получают из вяжущего, кремнеземистого компонента и воды, как и в технологии газобетона. Пену приготавливают в лопастных пенообразователях и центробежных насосах из водного раствора пенообразователей, содержащих поверхностно-активные вещества. В качестве последних применяют смолосапониновый, клеканифольный, алюмосульфонафтенный и синтетический пенообразователи.

Полученную пенобетонную смесь заливают в формы. Перед автоклавной обработкой отформованные пенобетонные изделия выдерживают до приобретения необходимой структурной прочности, тогда изделия не растрескиваются при перемещении форм и для них не опасно расширение воздуха, находящегося в порах-ячейках, происходящее при тепловой обработке.

Водопоглощение и морозостойкость зависят от величины и характера макропористости ячеистого бетона и плотности межпоровых перегородок. Для снижения водопоглощения и повышения морозостойкости стремятся к созданию ячеистой структуры с замкнутыми порами. Этому способствует вибрационная технология, так как при вибрации пенобетонной смеси разрушаются крупные ячейки, снижающие морозостойкость и однородность материала.

Пенобетон в настоящее время менее распространен, чем газобетон, однако ввиду своей низкой себестоимости (пенообразователи гораздо дешевле газообразователей) с каждым годом нарастает производство пенобетонных изделий. Более того, в последние годы в связи с созданием эффективных пенообразователей все большее распространение получают неавтоклавные пенобетоны, что

обусловлено стремлением упростить изготовление этого материала, сократить энергозатраты на производство и иметь возможность применения его в условиях стройплощадки. При этом пенобетоны отличаются от газобетонов характером своей структуры – замкнутой пористостью с мелкими сферическими порами. Газобетон имеет крупные поры, поэтому он в большей степени, чем пенобетон, нуждается в защите от воздействия окружающей среды.

Разновидностью пенобетона является *пеносиликат*. Он, как и его аналог, газосиликат, изготавливается на известково-песчаном вяжущем и подвергается автоклавной обработке.

Свойства и области применения ячеистых бетонов. Свойства ячеистых бетонов зависят от состава, условий образования и стабильности структуры ячеистой смеси. Она должна иметь определенное количество равномерно распределенных пор оптимальных формы и размера, а также сохранять свою структуру до достижения необходимой прочности. Характер пор – замкнутый, но стенки пор состоят из затвердевшего цементного камня, который сам пронизан порами, в том числе и капиллярными. Для движения воздуха поры в ячеистом бетоне замкнуты, а для проникновения воды – открыты, поэтому водопоглощение ячеистого бетона довольно высокое и морозостойкость соответственно пониженная по сравнению с бетоном плотной структуры [1].

Ячеистые бетоны характеризуются классами по прочности от В0,5 до В15, марками по морозостойкости от F15 до F100. Несмотря на большое водопоглощение ячеистые бетоны имеют сравнительно высокую морозостойкость. Это объясняется тем, что вследствие большого суммарного объема пор вода не заполняет их полностью и расширение воды при замерзании не разрушает камень. Теплопроводность ячеистых бетонов зависит от их плотности, влажности и ряда эксплуатационных факторов. При влажности 10 % и плотности 600, 800 и 1000 кг/м³ теплопроводность составляет соответственно 0,21, 0,28 и 0,36 Вт/(м·К).

Плотность неавтоклавного газобетона обычно находится в пределах 400...900 кг/м³, прочность – 0,5...3,5 МПа. Газосиликат отличается более высокими строительно-техническими свойствами (при плотности 300...600 кг/м³ его прочность составляет 0,8...3,5 МПа). Плотность пенобетона (с использованием в качестве заполнителя мелкого песка естественной дисперсности) обычно находится в пределах 600...1000 кг/м³, а прочность 0,5...3,5 МПа. Для получения пенобетонов с меньшей плотностью используют мелкие пески.

Ячеистые бетоны и изделия из них обладают высокими звукоизоляционными свойствами, огнестойкостью. Пористая структура ячеистых бетонов позволяет легко пилить, сверлить и обрабатывать данные строительные изделия. Они отличаются также хорошей гвоздимостью.

Главный недостаток ячеистых бетонов – повышенная влагоемкость, зависящая от величины открытых пор и вида исходных материалов. С повышением влажности бетона прочность его снижается, при полном насыщении влагой она может составлять лишь 65 % прочности в сухом состоянии. Поэтому конструкции из ячеистого бетона нельзя применять без специальной защиты в помещениях с повышенной влажностью.

Ячеистые бетоны обладают сравнительно большой сорбционной влажностью, паро- и воздухопроницаемостью, которая в 5...10 раз больше, чем у тяжелых бетонов. Поэтому наружную поверхность ограждающих конструкций защищают более плотными слоями раствора, природными каменными материалами, керамической плиткой, гидрофобными покрытиями на основе кремнийорганических пленкообразующих веществ и т.п. Защитные слои и покрытия должны предохранять ячеистый бетон от увлажнения атмосферной влагой, иметь с ним прочное сцепление, обладать морозостойкостью не менее 35 циклов и достаточной паропроницаемостью.

Ячеистые бетоны успешно применяются для производства легких железобетонных конструкций и теплоизоляции. Из них изготавливают панели наружных стен и покрытий зданий, неармированные стеновые и теплоизоляционные блоки, камни для стен. Как минимум одно такое изделие по объему заменяет 12 штук кирпича при массе в 3...4 раза меньшей, а по теплозащитным свойствам для получения одинакового эффекта толщину стены можно уменьшить в 5...6 раз.

Ячеистобетонные блоки (рис. 33) можно применять в несущих наружных стенах домов малой и средней этажности (до 4...5), а также в ненесущих наружных стенах многоэтажных зданий. Ячеистые бетоны в конструкции наружных стен удачно сочетаются с кирпичной облицовкой, что позволяет обеспечивать современные требования к теплоэффективности жилых домов.

Для кладки наружных и внутренних стен и перегородок следует применять блоки стеновые из ячеистого бетона автоклавного твердения классов по прочности на сжатие – B1; B1,5; B2; B2,5; B3,5; B5, марок по средней плотности – D400, D500, D600, марок по морозостойкости – F15, F25, F35, F50, F70.

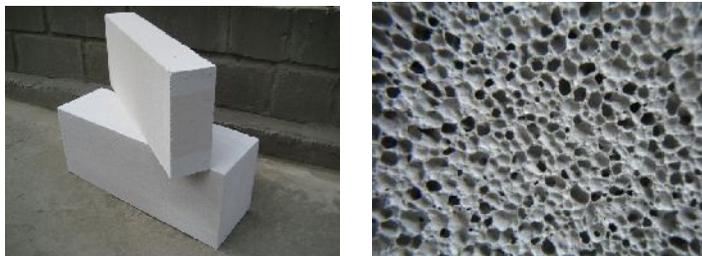


Рис. 33. Блоки из ячеистого бетона (*слева*) и поровая структура поверхности (*справа*)

Ячеистые бетоны по своим технико-экономическим показателям, а также основным строительным свойствам выгодно отличаются от других разновидностей легких бетонов и находят широкое применение как в России, так и за рубежом. Применение крупноразмерных изделий из ячеистого бетона позволяет значительно уменьшить массу ограждающих конструкций и снизить затраты на возведение зданий [28].

3.1.8. Особые виды бетонов

Высокопрочный бетон – отличается высокой прочностью при сжатии (60...80 МПа и более), высокой плотностью, практически нулевым водопоглощением. Его получают, используя комплекс мероприятий – правильный выбор цемента и заполнителей, эффективные средства приготовления и уплотнения бетонной смеси, а также создавая оптимальные условия твердения. Иногда ошибочно полагают, что высокую прочность бетона можно обеспечить, применяя высокие расходы цемента; однако перерасход цемента увеличивает усадку и снижает трещиностойкость бетона, удорожает бетон. Кроме того, даже высокий расход цемента не может обеспечить стабильные высокие показатели прочности при колеблющемся качестве заполнителей, при нарушении технологии и низкой культуре производства.

Достижение высокой прочности возможно только при максимальном использовании вяжущих свойств цемента, что требует создания благоприятных условий для протекания процессов гидратации, применении суперпластификаторов и дисперсного наполнителя – **микрокремнезема**.

Большое значение имеет прочность и чистота заполнителя, необходимая для обеспечения хорошего сцепления зерен с цементным

камнем. В качестве крупного заполнителя применяют фракционированный щебень из прочных, плотных и водостойких горных пород (плотных известняков, доломитов, песчаников).

Бетоны марок М500 и М600 применяют в конструкциях с предварительно напряженной арматурой: в балках, фермах, арках, колоннах и т.п. Применение высокопрочных бетонов взамен бетона М400 дает возможность уменьшить расход арматурной стали на 10...20 % и сократить объем бетона на 10...30 %. По мере увеличения выпуска предварительно напряженных конструкций будет возрастать потребность в высокопрочных бетонах. Используя материалы надлежащего качества и современные технологические приемы, можно изготавливать бетоны прочностью 80...100 МПа.

Высокопрочные бетоны применяют для ответственных сооружений – высотных зданий, защитных сооружений и т.д. В современных условиях возможно получать и особо высокопрочные бетоны с прочностью до 100 МПа и выше [29].

Морозостойкий бетон. Бетоны повышенной морозостойкости имеют марки свыше F200. Они предназначены для тех частей сооружений, которые подвергаются многократному замораживанию и оттаиванию во влажном состоянии. Это – зона переменного уровня гидротехнических сооружений, конструкции железобетонных градирен, цементно-бетонные покрытия дорог и аэродромов и т.п.

Морозостойкость зависит от качества исходных материалов, состава бетона и его структуры. В морозостойких бетонах рекомендуется применять сульфатостойкий портландцемент, являющийся одновременно и морозостойким. В нем не должно быть добавок вредных с точки зрения морозостойкости. Заполнители должны быть чистые и промытые от глинистых примесей. Важное значение имеет В/Ц (чем оно ниже, тем выше морозостойкость) и составлять не более 0,4...0,5.

Большое значение для повышения морозостойкости и водонепроницаемости бетона имеет применение поверхностно-активных веществ и гидрофобизирующих кремнийорганических жидкостей. Их вводят в количестве 0,05...0,2 % от массы цемента. Положительный эффект дают воздухововлекающие добавки, которые вовлекают воздух в бетонную смесь в количестве 3...5 % от объема бетона. Вовлеченный воздух образует мелкие замкнутые воздушные поры, в которых может отжиматься вода, замерзающая в крупных открытых порах. Гидрофобизирующие добавки, кроме того, придают бетону водоотталкивающие свойства, вследствие этого сильно

уменьшается водопоглощение материала. Все эти обстоятельства приводят к повышению морозостойкости бетона в несколько раз.

Жаростойкий бетон предназначен для промышленных агрегатов (футеровки печей, облицовки котлов и т.п.) и строительных конструкций, подверженных нагреванию (например, дымовых труб). Он должен сохранять свои физико-механические свойства при длительном воздействии высоких температур.

В качестве вяжущих для жаростойких бетонов используют глиноземистый цемент, портландцемент, шлакопортландцемент и жидкое стекло с кремнефтористым натрием. Тонкомолотой добавкой служат шамот, зола-унос, гранулированный доменный шлак. В качестве песка и щебня используют шамот, отвалный доменный шлак, базальт и др. При правильно подобранных заполнителях и вяжущем жаростойкий бетон может длительное время выдерживать без разрушений действие температуры до 1200°С. Из такого бетона изготавливают дымовые трубы, фундаменты доменных и других печей. Применение жаростойкого бетона взамен штучных материалов снижает стоимость и ускоряет строительство.

Бетон, защищающий от радиоактивных излучений, предназначен для конструкций биологической защиты, атомных электростанций, предприятий по производству и переработке изотопов и т.п. Такой бетон должен обладать большой плотностью, которую можно увеличить применением специальных заполнителей, поглощать гамма-излучение, замедлять нейтронные потоки. При его изготовлении используют особо тяжелый бетон, который в качестве заполнителей содержит железные руды (магнетит, лимонит), барит, металлическую дробь. Плотность таких бетонов достигает 4000...5000 кг/м³.

Гидротехнический бетон (рис. 34). Гидротехническим называется тяжелый бетон, который применяется для строительства плотин, гидроэлектростанций, шлюзов, причалов, мелиоративных и других аналогичных сооружений. К нему в зависимости от конкретных условий предъявляются требования по прочности, плотности, водонепроницаемости, трещиностойкости, атмосферостойкости и морозостойкости, водостойкости, коррозионной стойкости, низкому тепловыделению и в целом долговечности.

В зависимости от места и уровня расположения в гидротехническом сооружении различают бетон наружной и внутренней зон, подводный, надводный и расположенный в зоне переменного уровня воды. В самых неблагоприятных условиях находится наружный бетон в зоне переменного уровня воды, который

претерпевает многократное увлажнение и высушивание, замораживание и оттаивание, удар волн, а потому к нему предъявляются самые жесткие требования.



Рис. 34. Гидротехнический бетон

Для гидротехнического бетона установлены следующие классы по прочности на сжатие: В7,5; В10; В15; В20; В25; В30; В35; В40.

Мелкозернистый бетон – бетон, не содержащий крупного заполнителя (максимальный размер зерен заполнителя не превышает 10 мм). Его еще называют *цементно-песчаным* бетоном. Его целесообразно применять для обычных железобетонных конструкций, когда на месте нет крупного заполнителя, а возить заполнитель далеко и дорого. Он применяется для изготовления тонкостенных железобетонных конструкций. Свойства мелкозернистого бетона определяются теми же факторами, что и обычного бетона. Однако мелкозернистый бетон имеет некоторые особенности, обусловленные его структурой, для которой характерны большая однородность и мелкозернистость, высокое содержание цемента, отсутствие жесткого каменного скелета, повышенная пористость. Ввиду повышенного содержания в своем составе цементного камня, его усадка и ползучесть выше, чем у обычного бетона.

Ранее производство мелкозернистых бетонов сдерживалось необходимостью увеличения расхода воды и цемента вследствие высокой дисперсности заполнителей. В настоящее время развитие технологии бетона позволяет за счет специальных мер ликвидировать этот недостаток и в полной мере ощутить достоинства таких бетонов: возможность создания однородной структуры; отказ от дорогостоящего крупного заполнителя; возможность получения качественной поверхности изделий; легкая транспортируемость, в том числе по трубопроводам; эффективность армирования дисперсной арматурой. Для снижения расхода цемента и воды применяют

крупнозернистые чистые пески с хорошим зерновым составом, химические добавки-суперпластификаторы, интенсивное уплотнение бетонной смеси [30].

Армируя мелкозернистый бетон стальными сетками, получают *армоцемент* – высокопрочный материал для тонкостенных конструкций. Такой материал используют при изготовлении тонких плит (скорлуп) в пространственных покрытиях зданий и сооружений. Армоцемент обладает более высокой трещиностойкостью, огнестойкостью, водонепроницаемостью и морозостойкостью, чем обычный железобетон. Его использование в строительстве позволяет снизить массу конструкций и затраты материально-энергетических ресурсов.

Вводя в мелкозернистый бетон дисперсные волокна (фибру), получают *фибробетон*. Дисперсное армирование бетона повышает его трещиностойкость, прочность при растяжении, ударную вязкость, сопротивление истиранию.

Напрягающий бетон. Это бетон на основе расширяющихся цементов, предназначен для получения водонепроницаемых и самонапряженных конструкций. Использование специальных цементов, а также соответствующих добавок обуславливает компенсацию усадки бетона и даже определенное остаточное расширение, что позволяет получить плотную структуру и, соответственно, высокую степень водо- и газонепроницаемости. Кроме того, эти бетоны отличаются высокой морозостойкостью (марки от F300 до F1000 и более).

Пи-бетоны – группа бетонов, в которых полностью или частично в роли вяжущего выступают полимеры. К ним относятся *полимерцементные бетоны, бетонополимеры и полимербетоны*.

Полимерцементные бетоны – цементные бетоны, в которых на стадии приготовления смеси вводятся полимерные добавки. Добавки представляют собой водные дисперсии (эмульсии, латексы) или релаксированные сухие порошки (как сухое молоко) тех же полимеров. Содержание полимера в полимерцементных бетонах 5... 15 % от массы цемента. Чаще других используют дисперсии полиакрилатов, поливинилацетата и его сополимеров и латексы синтетических каучуков. Полимерные добавки, образуя в бетоне самостоятельные структуры, придают бетонам высокие адгезионные свойства, значительно повышают их износостойкость, ударную прочность и прочность при изгибе. Большее распространение, чем бетоны, находят полимерцементные растворы.

Бетонополимеры – бетоны, поры которых заполнены полимерами. Для достижения этого эффекта затвердевшие и высушенные бетонные элементы пропитывают жидкими мономерами или олигомерами, которые затем полимеризуются в порах бетона, переходя в твердое состояние. После такой обработки бетон приобретает высокую прочность (до 100...200 МПа), полную водонепроницаемость и очень высокую морозостойкость (F500 и более).

Полимербетоны – бетоны, в которых вместо минерального вяжущего используется полимерное. Вяжущим, как правило, служат жидко-вязкие олигомеры (например, эпоксидные и полиэфирные смолы). Смола играет роль и вяжущего, и воды, обеспечивая удобоукладываемость бетонной смеси. Твердение полимербетонов происходит в результате сшивки олигомера до состояния пространственного полимера.

Полимерные вяжущие придают бетону специфические свойства:

– высокую и универсальную химическую стойкость (самое важное свойство полимербетонов);

– высокую прочность (50...100 МПа) при нормальных температурах;

– водостойкость и водонепроницаемость;

– высокую износостойкость;

– низкую теплостойкость (до 100...300°C) – отрицательный фактор.

Используют полимербетоны, главным образом, в химической промышленности, в конструкциях, где необходима высокая химическая стойкость, при ремонте облицовок и изделий из декоративных горных пород (например, при восстановлении изношенных гранитных ступеней в метро). Используя отходы различной крупности, образующиеся при обработке декоративных горных пород, на полимерных вяжущих делают плиты и блоки. Их можно распиливать и обрабатывать как цельный природный камень. Полимерные вяжущие при этом наполняют порошком из горных пород, чтобы слой вяжущего не были заметны.

Кроме того, из таких бетонов изготавливают подоконные плиты, прилавки в магазинах и даже санитарно-техническое оборудование (раковины, ванны, джакузи и т.п.) (рис. 35). Цвет полимербетонов может быть любым, они хорошо окрашиваются различными пигментами (в том числе и органическими).



Рис. 35. Подоконник (*слева*) и ванна (*справа*), выполненные из полимербетона

Дорожный бетон незаменим при строительстве покрытий и оснований автомобильных дорог, аэродромов и дорог промышленных предприятий (рис. 36). К дорожному бетону предъявляются повышенные требования по прочности, плотности, износостойкости, морозостойкости и коррозионной стойкости, так как на бетон дорожных покрытий в процессе их эксплуатации воздействуют в комплексе многократно повторяющиеся статические и динамические нагрузки, вода, мороз, растворы солей, в отдельных случаях нефтепродукты. Дорожное покрытие работает на изгиб как плита на упругом основании, а поэтому, очень важным показателем бетона является предел прочности при изгибе.



Рис. 36. Дорожный бетон

Разновидностью дорожных бетонов является *асфальтобетон*, представляющий собой смесь асфальтового вяжущего с песком и крупным заполнителем – щебнем или гравием. Само асфальтовое вяжущее представляет собой смесь тонкоизмельченного минерального наполнителя (известнякового порошка) с битумом. Роль минерального порошка заключается не только в снижении расхода битума, но и в повышении температуры его размягчения. Это важно, например, для сохранения прочности асфальтобетона в летнее время.

Асфальтобетоны, как и полимербетоны, не затворяются водой. Они относятся к плотным бетонам, их пористость не превышает 5...7 %. Чем выше пористость, тем меньше долговечность бетона, так как при этом возрастает водопоглощение, снижается коррозионная стойкость и морозостойкость. Последнее – главный фактор разрушения дорожных покрытий. Плотные асфальтобетоны (имеющие пористость менее 5 %) практически водонепроницаемы и могут применяться как гидроизоляционный материал.

В отличие от бетонов на минеральных вяжущих прочность асфальтобетонов и растворов заметно изменяется при колебаниях температуры. Так, если при -15°C прочность асфальтобетона составляет 15...20 МПа, то при $+20^{\circ}\text{C}$ – 2...3 МПа, а при $+50^{\circ}\text{C}$ – только 0,8...1,2 МПа. При этом снижается модуль упругости и возрастает ползучесть асфальтобетона.

Асфальтовые бетоны значительно более стойки к коррозионным воздействиям, чем цементные, но боятся воздействия жидких топлив и масел. Износостойкость асфальтовых бетонов выше, чем цементных.

Асфальтобетоны и растворы применяются для устройства верхних покрытий дорог, аэродромов, полов промышленных зданий, плоских кровель, стяжек, а также в гидротехнике для создания гидроизоляционных слоев и экранов и заполнения компенсационных швов.

Декоративный (архитектурный) бетон. Для придания зданиям и сооружениям архитектурно-художественной выразительности применяют декоративные бетоны и растворы, для получения которых используют цветные цементы или же белые и вводят в их состав в количестве 1...5 % от массы цемента специальные неорганические светостойкие, атмосферостойкие и щелочестойкие пигменты: охра, железный сурик, мумия, оксиды марганца и хрома, диоксид титана, ультрамарин, кобальт зелёный, мел, сажу, окрашенные туфы, каолины или органические анилиновые, фталоцианиновые и другие красители в количестве 0,1...0,2 % от массы цемента. Хорошие результаты получаются при использовании заранее приготовленных в быстроходных смесителях цветных смесей, состоящих из пигментов, добавок и воды (рис. 37). Для этого желательно применять активизаторы цементного клея типа СА, РПА и др. Они обеспечивают получение высокооднородной и стабильной композиции.

Заполнителями и наполнителями служат щебень и песок из цветных горных пород (светлый песок, известняк, доломит, кварцит, мрамор, базальт, диабаз, габбро, гранит и др.) и пород, имеющих выразительную текстуру (рис. 38). Они должны иметь прочность не

менее 40 МПа, водопоглощение не более 4 мас. %, достаточную морозостойкость. Для придания конструкциям лучшего эстетического вида возможно введение в поверхностный слой бетонной смеси слюды, дробленого стекла и других подобных материалов.



Рис. 37. Цветные смеси



Рис. 38. Декоративный бетон с разноцветным заполнителем

Для обеспечения бетонной смеси большей пластичности расход цемента повышается до 450...500 кг/м³ при низком В/Ц (близком к нормальной густоте цементного теста). При этом содержание воды в смеси тщательно контролируется, так как от этого зависят стабильность цветной окраски поверхности материала и однородности бетона по плотности и прочности.

С целью снижения расхода цемента и повышения пластичности бетонной смеси в нее рекомендуется вводить ПАВ и особенно суперпластификаторы. Одновременно для повышения водо-, атмосферо-, и морозостойкости бетона в его состав целесообразно вводить гидрофобизаторы, модификаторы бетона и комплексные добавки, например, «суперпластификатор + КОЖ 136-41, МБ 01+ + КОЖ 136-41» и др., или пропитывать поверхностный слой полимерами. Желательно введение в бетон и расширяющих добавок

для компенсации усадочных деформаций и предотвращения появления усадочных трещин.

Камневидную фактуру без растворного фона следует получать за счет применения беспесчаных бетонных смесей или бетонных смесей с коэффициентом избытка раствора менее единицы. Обнажение заполнителя можно осуществлять за счет применения замедлителей схватывания и твердения цементного клея.

Для повышения художественной выразительности конструкций применяют специальные приемы, позволяющие наиболее полно использовать декоративные возможности бетона. В процессе обработки поверхности бетона алмазными дисками, цилиндрическими щетками, фрезами, пескоструйными аппаратами, бучардой получается шлифованная, бугристая, бороздчатая фактура, фактура с каннелюрами.

Все большее распространение находят комбинированные методы создания декоративных решений – сочетание цветового решения с рельефом поверхности фасадных частей зданий. Поверхность может быть гладкой, рельефной или с определенным рисунком. Для создания такой поверхности используют матрицы из стекла, стеклопластика, полимеров, нержавеющей стали и других материалов, а также разнообразные трафареты.

Другим способом декорирования бетона является обнажение поверхности заполнителя с помощью шлифования, полирования, водоструйной обработки (рис. 39).

Возможна комбинированная отделка изделий с архитектурными вставками из керамики, металла, полимера, природного камня и других материалов.

На практике часто для отделки конструкций используются декоративные растворы, наносимые слоем 20...25 мм на поверхность изделий из обычного бетона, что сокращает расход более дорогостоящих декоративных бетонов.

С целью повышения долговечности декоративного поверхностного слоя бетона применяются специальные методы его консервации: пропитка полимерами, флюатирование, гидрофобизация кремнийорганической жидкостью КОЖ 136-41 и др.

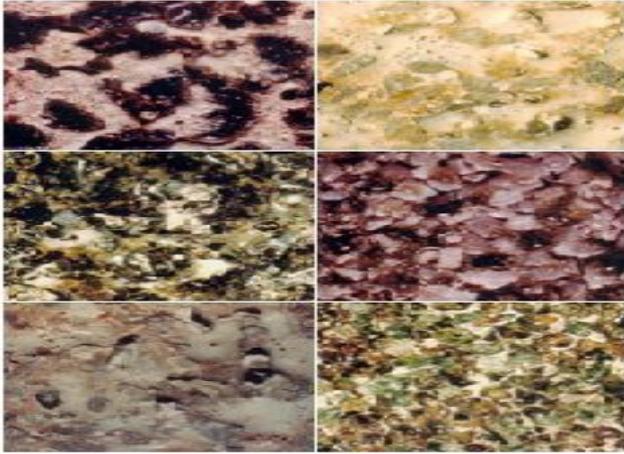


Рис. 39. Полированные поверхности декоративных бетонов

Этим же целям служит нанесение на поверхность конструкции покрытий, выполняющих одновременно роль отделки и защиты бетона от атмосферных воздействий. Так, для создания стекловидного покрытия на поверхности изделия в качестве сырья применяется бой оконного и тарного стекла с размером частиц до 10 мм, который наносится на поверхность бетонного изделия при его формировании. После оплавления стеклобоя горелкой получается стекловидное покрытие, отличающееся хорошими художественными достоинствами и долговечностью.

Аналогичное стекловидное покрытие серо-зеленого цвета получается и при оплавлении поверхностного слоя бетона плазмой.

Возможна отделка фасадных поверхностей особо значимых зданий цветными глазурями. Вначале на поверхности изделия устраивается подглазурный слой, на который в последующем наносится слой глазури толщиной 0,1...0,2 мм и оплавляется при температуре 1000°С. В результате получается отделка, обладающая высокими архитектурно-художественными качествами, долговечностью и хорошо защищающая бетон от атмосферных воздействий.

Использование декоративных бетонов и растворов позволяет создавать разнообразные архитектурные ансамбли с высокой художественной выразительностью, с учетом современных требований к градостроительству, национальных особенностей региона и области, рельефа местности и других факторов. В этом плане возможности декоративных бетонов и растворов в сочетании с другими материалами практически неограниченны.

3.1.9. Железобетон и изделия на его основе

Бетон – анизотропный материал с высокой прочностью при сжатии и значительно меньшей прочностью при растяжении. Чтобы восполнить этот недостаток и предотвратить разрушение бетонных конструкций растягивающими усилиями, в них вводят стальную арматуру с высоким сопротивлением растяжению (предельная растяжимость стали в 3...6 раз больше, чем у бетона). При изгибе строительных конструкций на различных участках возникают противоположные напряжения – растягивающие и сжимающие. Сталь воспринимает первые из них, а бетон – вторые. В результате железобетонная конструкция успешно противостоит как сжимающим, так и растягивающим нагрузкам.

Материал, в котором бетон и стальная арматура, соединенные взаимным сцеплением, работают под нагрузкой совместно, называется *железобетоном*. Совместная работа стали и бетона обеспечена тем, что бетон прочно сцепляется со стальным стержнем. Коэффициенты температурного расширения бетона и стали близки друг к другу, поэтому температурные деформации не вызывают нежелательных напряжений.

Само слово «арматура» в переводе с латыни означает «вооружение», т.е. стальная арматура как бы вооружает, укрепляет бетон. Каменные конструкции, армированные металлом, были известны давно, но в современном виде железобетон появился лишь во второй половине XIX в., когда было освоено промышленное производство портландцемента. Патент на производство железобетона был выдан французу Ж. Монье в 1867 г. Первоначально железобетон применялся довольно ограничено. В настоящее время это основной конструкционный материал в жилищном и промышленном строительстве.

Смысл армирования можно пояснить на элементах, работающих на изгиб (балках, ригелях). В таких элементах часть поперечного сечения элемента подвергается сжатию, а другая – растяжению. Если балку изготовить из неармированного бетона, то вследствие низкой его прочности при растяжении (1...4 МПа) уже под небольшой нагрузкой бетон в растянутой зоне растрескается (рис. 40, *а*) и балка разрушится. Если же в растянутую зону ввести стальную арматуру, то она примет на себя растягивающие напряжения (прочность растяжения стали более 200 МПа), и балка, хотя на ней и могут появиться трещины, не разрушается даже при больших нагрузках (рис 40, *б*). В ряде случаев армируют элементы, работающие на сжатие (колонны, сваи), так как на сжатие сталь в 5...10 раз прочнее бетона.

Причиной, почему арматура принимает на себя бóльшую часть нагрузки, является различие в модулях упругости стали ($2 \cdot 10^5$ МПа) и бетона ($2 \cdot 10^4$ МПа). Из-за того, что модуль упругости стали в 10 раз выше модуля упругости бетона, при нагружении железобетонного элемента сталь и бетон получают одинаковые деформации, но напряжения в них, в соответствии с законом Гука, будут разные. В стали они будут в 10 раз выше, чем в бетоне. Иными словами, 2 см² сечения стали заменяют 10 см² бетона [31, 32].

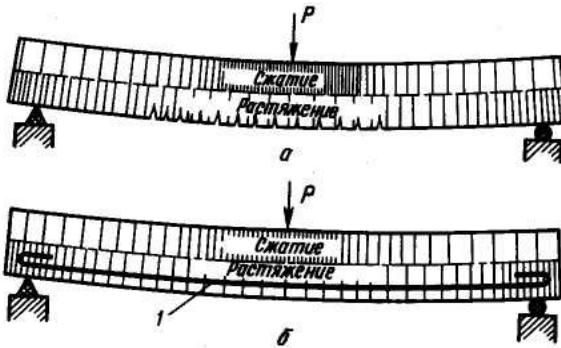


Рис. 40. Неармированная бетонная (а) и армированная железобетонная (б) балки: 1 – арматура

По характеру работы в железобетонных конструкциях арматуру подразделяют на *рабочую* и *монтажную*. Рабочая воспринимает усилия от внешних нагрузок и собственной массы конструкции, обеспечивает прочность и надежность при эксплуатации; монтажная служит для сборки каркаса и обеспечивает заданное положение рабочей арматуры при бетонировании. К монтажной арматуре относятся монтажные петли, крючки, закладные детали.

Для увеличения сцепления арматуры с бетоном на концах гладких стержней устраивают крючки, придают арматуре периодический профиль, различные рифления, применяют сварные сетки, используют некоторые разновидности стальных анкеров и т.п.

Основной вид арматуры для производства железобетона в строительной индустрии до 90-х годов прошлого века был освоен на металлургических заводах по ГОСТ 5781. Этот арматурный профиль (рис. 41, а) прокатывается с нанесением рифления на поверхность круглого сердечника и имеет кольцевые поперечные ребра, пересекающиеся с продольными ребрами.

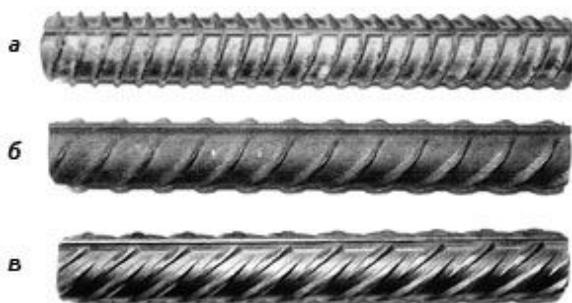


Рис. 41. Виды арматуры:

a – кольцевого профиля; *б* – серповидного профиля;
в – профиля, разработанного И. Н. Тихоновым

С 1990 г. многие металлургические заводы стран СНГ, производящие арматурный прокат для строительства, начали массовое освоение зарубежных рынков сбыта своей продукции, ориентируясь при этом на требования стандартов стран-покупателей арматурной стали. Основные производители арматуры в СНГ перешли на выпуск нового проката с периодическим профилем европейского образца по СТО АСЧМ 7–93 и ГОСТ 1088–94 (рис. 41, *б*). В странах Европы и СНГ серповидный профиль широко используется и выполняется согласно нормам EN–10080–1 (1998). По сравнению с кольцевым серповидный профиль способствует формированию более высоких (выше на 4...8 %) прочностных и пластических свойств при прокатке, не имеет концентраторов напряжений в виде пересечений, однако имеет худшие показатели, характеризующие прочность и жесткость сцепления с бетоном. Многочисленными исследованиями доказано, что в массивных конструкциях с большой толщиной защитного слоя бетона экономически целесообразно применять кольцевой профиль из-за его высокой анкерующей способности. В конструкциях тонкостенных, особенно предварительно напряженных, объективно применение арматуры серповидного профиля для обеспечения высокой степени их эксплуатационной надежности.

В 2002 г. руководителем Центра проектирования и экспертизы НИИЖБ (Москва) И. Н. Тихоновым было найдено оригинальное компромиссное решение, которое позволяет в основном разрешить противоречия между профилями по ГОСТ 5781 и СТО АСЧМ 7–93. Новый арматурный профиль по своей конструкции и взаимодействию с бетоном выгодно отличается от кольцевого и серповидного главным образом из-за чередования по длине стержня вершин смежных серповидных поперечных ребер во взаимно перпендикулярных осевых

плоскостях (рис. 41, в). Он обеспечивает высокую жесткость и прочность сцепления при низкой распорности в бетоне. На рис. 42 показаны внешне разнообразные виды холоднодеформированной арматуры. Виды арматурных сеток и каркасов и типы закладных деталей сборных железобетонных элементов представлены на рис. 43, 44.

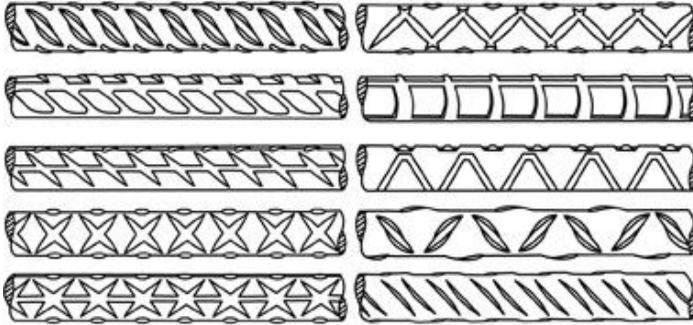


Рис.

42. Виды холоднодеформированной арматуры

В зависимости от способа армирования различают железобетонные изделия с *обычной* и *предварительно напряженной* арматурой. При обычном армировании производится укладка в бетон стальных стержней, сеток или каркасов. Однако при изгибе такой способ армирования не предохраняет от образования трещин в растягиваемой зоне бетона. Чтобы предельная деформация наступала в бетоне и стали одновременно, нужно соединить бетон с частично растянутой арматурой. Это достигается ее предварительным напряжением.

При напряжении арматуру после укладки в форму растягивают тем или иным способом, закрепляют в растянутом состоянии и после заполнения формы бетонной смесью и ее затвердевания освобождают от растяжения. При этом арматура сокращается и увлекает сцепившийся с ней бетон, обжимая железобетонный элемент в целом.

Таким образом, цель натяжения арматуры – создание в бетоне предварительного обжатия, превышающего растягивающее напряжение, возникающее при эксплуатации бетона. При нагрузке предварительно напряженные изделия растягивающей или изгибающей силой арматура будет продолжать упруго растягиваться и воспринимать усилия (так как при натяжении арматуры используется далеко не весь предел ее прочности). При этом напряжения сжатия в бетоне начнут уменьшаться, достигнут нулевого значения и только

уже близко к пределу разрушения конструкции возникнут растягивающие усилия, причем значительно меньшие, чем в бетоне, армированном без предварительного напряжения. Трещины образуются значительно позже, а величина их меньше.

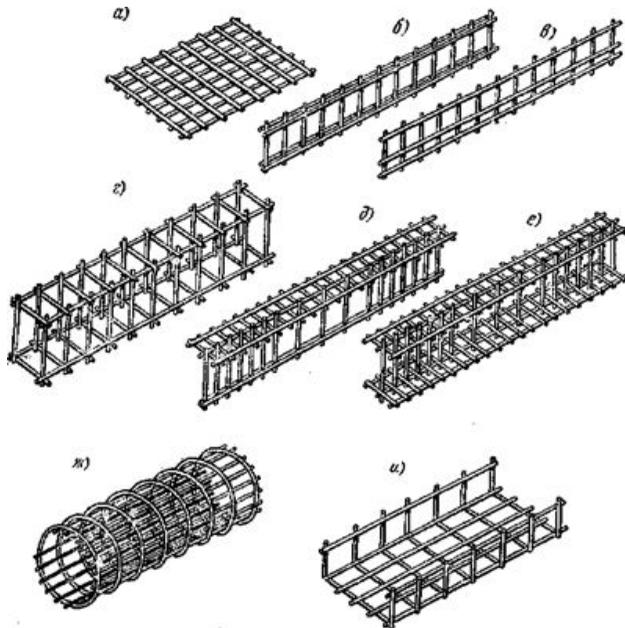


Рис. 43. Виды арматурных сеток и каркасов
а, б, в – плоские; г, д, е – пространственные; ж – круглый; з – гнутый

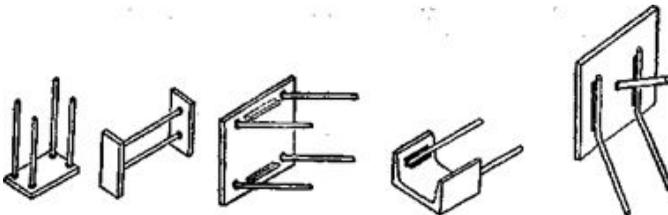


Рис. 44. Типы закладных деталей сборных железобетонных элементов

Предварительное напряжение позволяет применять для армирования высокопрочную сталь, снижая расход металла в 2... 2,5 раза. Соответственно используется и бетон повышенной прочности, что дает возможность уменьшить сечение конструкции. В

предварительно напряженных железобетонных конструкциях более полно используется прочность стали и бетона, поэтому уменьшается масса изделий. Кроме того, предварительное обжатие бетона, препятствуя образованию трещин, повышает его долговечность и непроницаемость. Пониженный расход металла, меньшая масса и повышенная трещиностойкость предварительно напряженного бетона обеспечили широкое его распространение. В России, где впервые в мире было начато серийное заводское производство сборных, предварительно напряженных конструкций, темпы роста их производства были исключительно высоки и значительно опережали темпы роста производства всего сборного железобетона.

Натяжение арматуры производится двумя способами: *механическим* – с помощью домкратов и других натяжных машин и *электротермическим* – с нагревом арматурных элементов электрическим током. После нагрева формы, закрепленные на жестких упорах, остывают, сжимаются и в них возникают необходимые напряжения. Электротермический способ является более экономичным и производительным.

В современном строительстве бетон и железобетон – основные строительные материалы. Благодаря универсальности и комплексу ценных свойств железобетонные конструкции на тяжелых и легких бетонах используются для строительства всех типов зданий и инженерных сооружений. Так, массовое строительство жилых зданий осуществляется из сборного железобетона, причем из него выполняют все элементы здания. В многоэтажных кирпичных зданиях фундаменты и перекрытия – железобетонные. Промышленные здания и инженерные сооружения в основном возводят из железобетона.

Широкое применение железобетона обеспечивает экономию металла и древесины в строительстве, способствует повышению эффективности труда и темпов строительных работ. В зависимости от способа изготовления железобетонные конструкции могут быть *монолитными* и *сборными*.

Монолитный железобетон. Так называют железобетон, изготавливаемый непосредственно на строительной площадке. На месте возведения конструкции устанавливают опалубку. Назначение опалубки – придать бетонной смеси при ее укладке форму будущей конструкции. Опалубку выполняют из древесины, фанеры, стали или различных их комбинаций. Обычно применяют разборно-переставную опалубку из мелких или крупных щитов.

В опалубку укладывают арматуру, затем заливают бетонную смесь. Последнюю уплотняют глубинными или поверхностными вибраторами, навешиваемыми на опалубку.

Бетон после укладки первые 7...10 дней необходимо защищать от высыхания, а зимой – от замерзания. В противном случае не будет достигнута требуемая прочность. Бетон твердеет обычно естественным путем, зимой возможен его подогрев. Опалубку снимают до достижения бетоном достаточной прочности, чаще всего через 7...10 дней.

В последние годы монолитный железобетон применяют все шире. Из него возводят здания и сооружения, не поддающиеся разделению на однотипные элементы, при особо больших или динамических нагрузках на конструкции зданий и сооружений (например, фундаменты и каркасы многоэтажных жилых и промышленных зданий, особенно в сейсмических районах), гидротехнические сооружения и т.п.

С каждым годом расширяется строительство из монолитного бетона городских и сельских жилых зданий. Особенно эффективно такое строительство в случае применения специально изготовленной металлической опалубки многократного использования, что позволяет добиться большой точности изготовления строительных конструкций при низких трудозатратах.

Для монолитного строительства используются тяжелые и легкие бетоны на быстротвердеющих цементах. При правильной организации труда скорость строительства из монолитного бетона не уступает скорости монтажа из сборных элементов.

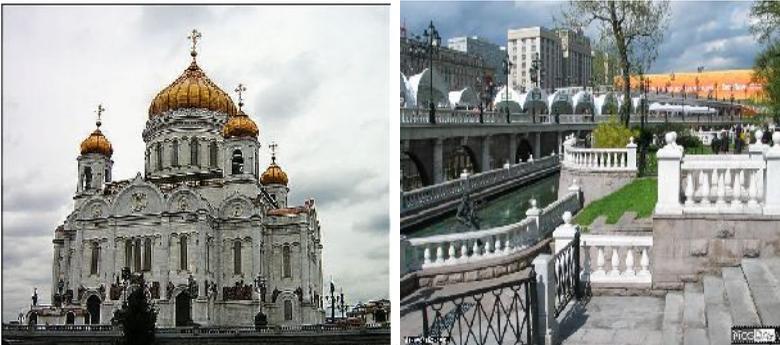


Рис. 45. Храм Христа Спасителя (слева) и подземный торговый комплекс «Охотный ряд» (справа)

За последние годы в городах России построено много нестандартных сооружений из монолитного бетона, в том числе и такие уникальные, как храм Христа Спасителя, подземный торговый комплекс на Манежной площади в Москве и др. (рис. 45). В монолитных конструкциях более эффективно достигаются необходимые эксплуатационные качества зданий: герметизация наружных стен, звукоизоляция, огнестойкость, долговечность.

Сборный железобетон. Сборные железобетонные изделия и конструкции представляют собой крупноразмерные элементы, изготавливаемые на заводе или полигоне домостроительного комбината. Основное преимущество таких конструкций – высокомеханизированные и автоматизированные методы их изготовления; на стройплощадке эти элементы только монтируют, что резко сокращает сроки строительства, повышает производительность труда и позволяет широко применять новые эффективные материалы (легкие и ячеистые бетоны, отделочную керамику, пластмассы).

Для изготовления сборных железобетонных конструкций применяют все основные виды бетона: тяжелые, легкие и ячеистые. Бетоны часто применяют в сочетании с материалами специального назначения (теплоизоляционными, звукоизоляционными, гидроизоляционными, антикоррозионными), которые значительно улучшают эксплуатационные качества сборных конструкций и повышают их долговечность.

Из сборного железобетона изготавливают все части зданий: фундаменты, стены подвала, наружные и внутренние стены, элементы каркаса, междуэтажные перекрытия, кровлю, лестницы и др. Сборный железобетон является наиболее индустриальным видом строительной технологии. Именно сборный железобетон обеспечил решение жилищной проблемы в нашей стране.

3.1.10. Основные виды сборных железобетонных изделий

Изделия для фундаментов зданий. К ним относятся *фундаментные плиты (блоки)* – массивные железобетонные элементы трапециевидной или прямоугольной формы, укладываемые при устройстве фундамента непосредственно на грунт (рис. 46, а).

Бетонные блоки для стен подвалов – элементы в форме прямоугольного параллелепипеда из тяжелого бетона, керамзитобетона и силикатного бетона плотностью не менее 1800 кг/м³ и класса В7,5...В15. Применяют блоки для устройства

ленточных фундаментов и возведения стен подвалов для зданий всех видов (рис. 46, б, в).

Фундаментные блоки стаканного типа. Применяются в каркасных зданиях для опирания колонн. Они могут состоять как из одного элемента, так и из двух – отдельно блок и стакан (рис. 46, г).

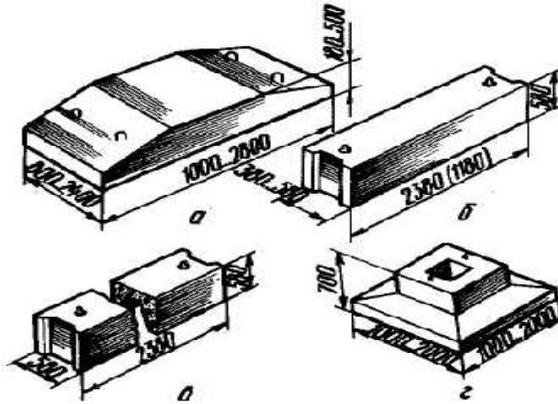


Рис. 46. Изделия для фундаментов:
а – блок-подушка; *б* – блок для стен подвалов сплошной;
в – то же, пустотелый; *г* – блок стаканного типа

Изделия для каркасов зданий. Это колонны; горизонтальные связи – ригели, прогоны, балки, фермы, арки. Их изготавливают из тяжелого бетона класса не ниже В15 и армируют несущей арматурой. Ригели, балки и фермы часто изготавливают из напряженно-армированного бетона. Все изделия для надежной связи друг с другом и передачи нагрузки имеют металлические закладные детали.

Изделия для каркасов промышленных зданий (рис. 47) отличаются от аналогичных изделий большей несущей способностью и размерами. Так, высота колонн для жилых зданий достигает 7,5 м, а промышленных – 35 м.

Балки в зависимости от перекрываемого пролета могут иметь тавровое или двутавровое сечение с отверстиями в вертикальной стенке для снижения ее массы. Изготавливают балки из бетона класса В25...В30, армирование – напряженное. Длина балок – 12, 18 и 24 м.

Фермы (рис. 48) применяют как элементы покрытий пролетом 30 м и более, сборные железобетонные арки – для пролетов более 60 м.

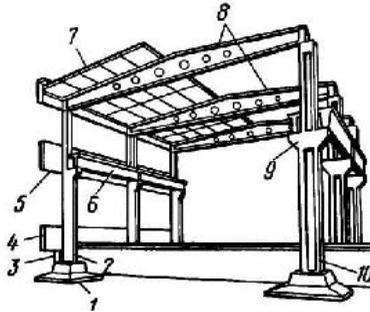


Рис. 47. Схема одноэтажного промышленного здания с железобетонным каркасом:

1 – фундамент под колонны; 2 – колонны наружного ряда; 3 – подкладка;
4 – фундаментная балка; 5 – стеновая панель; 6 – подкрановая балка; 7 – плита
покрытий; 8 – балки покрытия; 9 – консоли колонн; 10 – колонны внутреннего ряда

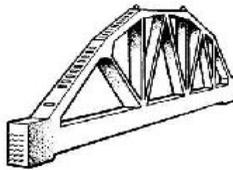


Рис. 48. Железобетонная ферма

Стеновые бетонные блоки предназначены для жилых и общественных зданий, а также производственных зданий промышленного и сельскохозяйственного назначения. Размер блоков зависит от конструктивного решения здания и схемы разрезки стены: так, длина блоков может быть 40...330 см, высота – 30...390 см. Толщина назначается по теплотехническим и конструктивным соображениям: для наружных стен 20...60 см, для внутренних – 16...30 см [1].

Для наружных стен блоки могут быть одно- и двухслойными. Изготавливают их из различных видов бетона. Однослойные блоки изготавливают, главным образом, из легких бетонов на пористых заполнителях класса В3,5...В7,5, плотностью 900...1500 кг/м³ или ячеистых бетонов класса В2...В7,5, плотностью 600...1000 кг/м³. Двухслойные блоки из утепляющих и изолирующих слоев применяют, главным образом, для зданий с повышенной влажностью воздуха. Утепляющий слой выполняют из конструкционно-

теплоизоляционного бетона. Внутренний изолирующий слой – из тяжелого бетона. Его назначение – ограничить влагопередачу от внутренней стороны стены к наружной, чтобы защитить утепляющий слой от увлажнения.

Блоки внутренних стен делают однослойными. Вид и класс используемого бетона зависят от конструктивного решения стены. В настоящее время крупноблочное строительство уступает место панельному.

Стеновые панели – крупноразмерные элементы (обычно высотой на этаж и длиной до 6 м) для монтажа полносборных зданий. В зависимости от назначения и конструктивных особенностей подразделяют на следующие виды:

– панели наружных стен отапливаемых зданий, изготавливаемые из легких бетонов на пористых заполнителях, ячеистых бетонов или тяжелых бетонов с теплоизоляционным слоем;

– панели наружных стен неотапливаемых зданий и внутренних несущих стен, изготавливаемые из тяжелых или легких бетонов;

– панели перегородок, обычно изготавливаемые из гипсобетона.

Наибольшее распространение в жилищном и общественном строительстве получили панели из легких бетонов на пористых заполнителях и панели из автоклавных ячеистых бетонов. Толщина панелей, в зависимости от вида бетона и климатических условий на месте строительства, 16...40 см. Масса панелей достигает 5 т. В технико-экономическом отношении наиболее высокими достоинствами обладают крупноразмерные вибропркатные керамзитобетонные панели.

Панели выпускают с наружной защитно-декоративной отделкой (керамической плиткой, декоративными бетонами, водостойкими красками и т.п.) и внутренней подготовкой под отделку (рис. 49).



Рис. 49. Наружная стеновая панель

Элементы междуэтажных перекрытий. В зданиях всех типов используются железобетонные панели перекрытий (рис. 50). Размеры панелей: длина 2,4...12 м, ширина 1,2...3,6 м, толщина 22 см. Панели изготовляют из бетона класса не менее В15 и армируют обычной или предварительно напряженной арматурой.

Панели перекрытий кроме несущей способности должны удовлетворять требованиям звукоизоляции. Для повышения звукоизоляционных свойств и снижения массы панели изготовляют с пустотами (главным образом круглого сечения) или из легких бетонов на пористых заполнителях; применяют и ребристые панели перекрытий со звукоизоляционными прослойками. Нижняя сторона панели выпускается в готовом к отделке виде и служит потолком, а верхняя – основанием пола.

Панели и плиты покрытий. В зависимости от конструкции кровли они должны удовлетворять помимо несущей способности требованиям гидро- и пароизоляции, а для совмещенных (теплых) кровель – и теплоизоляции.

Панели покрытий изготовляют однослойными из тяжелого бетона и легкого на пористых заполнителях; слоистыми с несущей конструкцией из тяжелого бетона и теплоизоляционным слоем из ячеистого бетона или другого утеплителя; комбинированными в виде плиты из ячеистого бетона с ребрами из тяжелого бетона.



Рис. 50. Железобетонные плиты перекрытий



Рис. 51. Железобетонная санитарно-техническая кабина

Санитарно-технические устройства. Элементы водоснабжения, канализации, вентиляции могут быть также выполнены в виде железобетонных изделий заводского изготовления. Водопроводные и канализационные трубы замоноличивают в тело специальных панелей; таким же образом изготовляют отопительные панели. Для устройства вентиляции применяют специальные блоки со сквозными каналами.

Применение таких блоков существенно упрощает санитарно-технические работы на стройке.

Одной из эффективных разновидностей санитарно-технических устройств являются *санитарно-технические кабины* (рис. 51) – полностью оборудованные и отделанные объемные элементы: в них установлены ванны, раковины, унитазы, смесители, а вся система труб сосредоточена внутри задней полой стенки кабины. Такие кабины на стройке только подключают к соответствующим сетям.

Лестничные марши и площадки изготовляют из бетона класса не менее В15. Ступени лестниц должны иметь отделанную поверхность. Лестничные площадки, как правило, покрывают керамической плиткой. Лестничные марши и площадки (рис. 52) могут быть выполнены в виде одного цельного элемента.

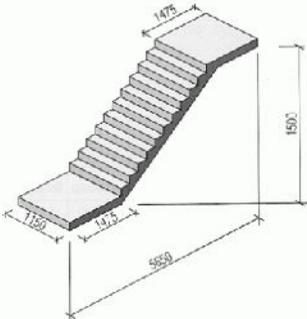


Рис. 52. Железобетонные лестничные марши и площадки

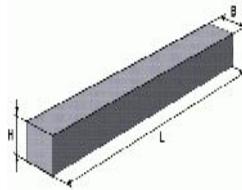


Рис. 53. Железобетонная перемычка

Железобетонные перемычки (рис. 53) для перекрытия оконных и дверных проемов в кирпичных зданиях бывают брусковые, плитные и балочные. Перемычки изготовляют из тяжелого или легкого бетонов. Класс бетона не менее В15, марка по морозостойкости в зависимости от климатических условий F35...F200.

Изделия для инженерных сооружений. Железобетонные изделия широко применяют в дорожном строительстве (плиты покрытий дорог, бортовые камни, элементы мостов и путепроводов, шпалы (рис. 54), осветительные столбы и столбы контактной сети); при строительстве городских инженерных сетей (напорные и безнапорные железобетонные трубы (рис. 55) диаметром от 0,5 до 3 м, элементы коллекторов и др.); при строительстве гидросооружений и мелиоративных систем.



Рис. 54. Железобетонная шпала Рис. 55. Железобетонные трубы

3.1.11. Коррозия цементного камня и бетона

Изделия из цемента или бетона, как и из всякого другого материала, со временем в условиях своей службы подвергаются коррозии (разрушению). В условиях службы на бетон действуют природные воды (речные и морские) под давлением и просто омывающие; промышленные и бытовые воды (стоки); периодически и многократно повторяющиеся теплосмены (сезонные и дневные колебания температур); процессы увлажнения и высыхания (колебания атмосферной влажности, специфические условия службы). Кроме того, на бетоны влияют механические воздействия – удары волн, выветривание, истирание и биологически вредные воздействия бактерий. Все названное составляет внешние причины коррозии и разрушения бетона.

К разрушению бетонного тела приводят и внутренние причины – высокая его водопроницаемость, взаимодействие щелочей цемента с кремнеземом заполнителя, изменение объема из-за различия температурного расширения цемента и заполнителя [3].

Физические факторы коррозии охватывают температурные (попеременное замораживание и оттаивание, нагревание и охлаждение) и влажностные колебания среды, ведущие к появлению деформаций материала и его разрушению. Сюда же следует отнести и разрушение изделия за счет подсоса и кристаллизации солей в порах и капиллярах бетонного тела – солевая форма коррозии.

Химические факторы коррозии включают воздействие водной и газовой сред на бетонное тело (водные растворы кислот, щелочей, солей), а также разнообразных органических веществ.

Физическая коррозия. Влиянию пониженных температур – попеременному замораживанию и оттаиванию – подвергаются практически все открытые сооружения, служащие в условиях

атмосферного воздействия. Особо опасная ситуация возникает когда воздействуют одновременно низкая температура и растворы солей, например, при работе бетона в морских сооружениях. Суть действия пониженной температуры в бетоне заключается в возникновении деформаций расширения замерзающей воды в опасных порах, которая может привести к разрушению. Возникают по меньшей мере два источника разрушающих сил: первый – увеличение объема воды при замерзании, что ведет к возникновению большого гидравлического давления на стенки пор и капилляров; второй – осмотическое давление, возникающее благодаря локальному увеличению концентрации раствора из-за отделения замерзающей воды от раствора. Многократные теплосмены постепенно расшатывают структуру цементного камня и бетона, снижают его прочность и в момент, когда давление расширения превышает прочность при растяжении, бетон разрушается. Основную роль в разрушении при действии низких температур играют как общая пористость, так и характер капиллярно-пористой структуры материала – в ответственном камне имеются поры, наиболее опасные и ответственные за развитие разрушения материала. Поскольку морозостойкость искусственного камня зависит от характера и величины общей пористости, то ее снижением можно добиться существенного повышения морозостойкости. Общую пористость можно уменьшить снижением В/Ц, использованием цемента с пониженной водопотребностью, а также введением разного типа добавок – пластифицирующих, гидрофобизирующих, воздухововлекающих.

Условия работы цементных и бетонных конструкций могут быть таковыми, что они будут находиться в сфере воздействия повышенных температур. Вредное воздействие температуры на затвердевшие бетоны начинается при 150...200°C, усиливается при 500°C и выше и состоит в разложении вначале гидратных образований, а затем и других составляющих цементного камня. Поэтому не рекомендуется применять бетоны на обычных цементах при температурах выше 250°C.

Попеременное увлажнение и высыхание цементного камня и бетона вследствие, например, климатических особенностей атмосферы или специфических условий работы конструкции вызывает соответственно деформации – набухание и усадку.

К физическим видам коррозии относится также разрушение бетона вследствие кристаллизации солей. Особенно это часто происходит в условиях сухого и жаркого климата. Солевые растворы в таком случае

регулярно поступают в поры бетона, одновременно происходит и испарение воды. Выделяющиеся из раствора соединения при кристаллизации оказывают давление на стенки пор и капилляров, что может вызвать деформации бетона, а иногда и полное его разрушение. Особенно сильным оказывается давление кристаллизации, когда образующиеся соли вначале безводны, а затем переходят в кристаллогидраты. Такой вид коррозии можно предотвратить, используя бетоны с малой открытой пористостью или защищая их гидроизолирующей.

Химическая коррозия. Действие воды и водных растворов (неорганических и органических веществ – кислот, щелочей, солей) в условиях службы бетонных и железобетонных конструкций, а также некоторых газов приводит к разрушению бетонного и цементного камня. Причины разрушения заключаются в химическом взаимодействии агрессивной среды и составляющих бетона. Химическая коррозия является наиболее опасным видом коррозии, и она имеет несколько разновидностей.

Коррозия выщелачивания представляет собой постепенное растворение и вымывание извести из бетона. Это сопровождается нарушением структуры бетона и снижением плотности и прочности. Процесс выщелачивания сопровождается белым налетом и потеками на поверхности бетонных сооружений, поэтому его еще называют «белой смертью» бетона.

Наблюдается такой вид коррозии при службе бетона в условиях фильтрации воды под давлением или просто омывания водой. На процессе разрушения бетона при выщелачивании сказываются: скорость растворения составляющих цемента, скорость движения воды, ее обновление у поверхности, химический и минеральный составы цементного камня и плотность бетона, характер конструкции, а также химический состав действующих вод. В условиях действия агрессивных выщелачивающих вод следует выбирать цемент с гидравлическими добавками, с одной стороны, и стремиться к получению бетонов с наиболее плотной структурой – с другой. Так, следует отметить, что водонепроницаемость бетонов из пуццолановых цементов по сравнению с обычным связана с тем, что активный кремнезем связывает $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в нерастворимый гидросиликат, препятствуя таким путем ее вымыванию.

Сульфатная коррозия. Грунтовые воды зачастую содержат в себе сульфаты кальция и магния. Сульфаты вступают в реакцию с составляющими бетона – гидроксидом кальция и гидроалюминатами кальция. Продукты взаимодействия имеют значительно больший

объем, чем исходные компоненты и поэтому вызывают разбухание и искривление конструктивных элементов и разрушение бетона.

Сульфатостойкость можно повысить, уменьшая содержание в цементе алюминатов, а также снижением осмотического давления поровой жидкости путем связывания максимально большого количества извести в период ранней гидратации.

Магнезиальная коррозия. Всякая растворимая соль магния, содержащаяся в воде, взаимодействует с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием нерастворимой $\text{Mg}(\text{OH})_2$, не обладающей вяжущими свойствами, а также растворимой соли кальция. Это взаимодействие приводит к разрушению бетона.

Верный путь повышения стойкости бетона к сульфатной и магнезиальной агрессии состоит в уменьшении содержания в цементном камне составляющих, способных к взаимодействию с тем или иным компонентом разрушающей среды. Например, снижением содержания C_3A до 5 % удастся получить сульфатостойкий цемент. Определенным должно быть также и количество C_3S , поставляющего при гидратации свободный $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Важным фактором является повышение плотности бетона, его непроницаемости; хорошее уплотнение бетона, в том числе в конструкции стыков, имеющих важное значение.

Кислотная коррозия бетонов обуславливается действием кислот неорганических и органических сред. Суть действия кислоты заключается в реакции с составляющими цементного камня, в результате которого образуются легко растворимые соли, которые вымываются из бетона. Образующиеся же нерастворимые соединения, например, $\text{Si}(\text{OH})_4$ или $\text{Al}(\text{OH})_3$, остаются в виде рыхлых масс. Скорость разрушения бетонов при этом виде коррозии зависит во многом от растворимости продуктов реакции. Агрессивность среды при кислотной коррозии оценивается водородным показателем (pH); при pH от 6 и ниже становится заметным отрицательное воздействие кислой воды на бетон. Следует отметить, что все виды портландцемента не кислотостойки.

К кислотному типу коррозии относится углекислотная коррозия бетона. Такой вид разрушения зависит от концентрации растворенной углекислоты в воде, а также содержания ионов кальция, гидрокарбонатов и характера бетона. Проявляется углекислотная коррозия в растворении поверхностной карбонатной пленки или образовавшегося на поверхности бетона CaCO_3 , ускоряя тем самым выщелачивание. Наиболее стойки в углекислотных водах

глиноземистый и пуццолановый цементы; снижает углекислотную агрессию также введение в бетон до 25 % тонкомолотого известняка.

Среди органических кислот наиболее агрессивными оказываются молочная и уксусная кислоты.

Нефть и горючие масла не оказывают заметного воздействия на бетон, так как эти вещества химически не взаимодействуют с составляющими цементного камня. Растительные же и животные жиры вредны для бетона, поскольку содержат свободные органические кислоты.

Долговечность бетонных изделий в большей степени зависит от плотности, водонепроницаемости и вида применяемого цемента, а также специальных мер, связанных с изоляцией бетона от агрессивной среды (окраски, оклейки, оштукатуривания, различных способов гидроизоляции). Меры защиты от коррозии принимаются в каждом конкретном случае в зависимости от ее причины и условий эксплуатации.

Основные пути защиты цементных материалов от коррозии:

- правильный выбор типа цемента;
- снижение капиллярной пористости цементного камня, например, за счет уменьшения количества воды затворения (снижения В/Ц);
- надежная гидроизоляция, не допускающая фильтрации воды сквозь материал.

Для защиты бетона от коррозии его поверхность гидроизолируют полимерными пленками, битумом, керамической плиткой, иногда применяют поверхностную пропитку водоотталкивающими составами. Решающий фактор повышения коррозионной стойкости бетона – увеличение его плотности путем подбора рационального состава и тщательного уплотнения бетонной смеси. Чем плотнее бетон, тем меньше возможность проникновения в него воды, а следовательно, и ее корродирующее действие. Учитывая, что $\text{Ca}(\text{OH})_2$ наиболее уязвимая составляющая цементного камня при коррозии, ограничивают ее количество, снижая соответственно в клинкере содержание C_3S , либо связывая $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в нерастворимое соединение введением в цемент активных минеральных добавок.

С коррозией бетона тесно связана и коррозия арматуры, которая также может служить причиной разрушения железобетонных конструкций. Продукты коррозии (ржавчина) накапливаются на арматуре, оказывая давление на бетон, вызывают трещинообразование и отслоение защитного слоя. Особого внимания требуют высокопрочные арматурные стали, подверженные коррозионному растрескиванию, вызывающему обрыв напряженной арматуры.

Предусматриваемые меры защиты от коррозии одновременно обеспечивают и сохранность арматуры, поскольку цементный камень защищает ее от проникновения агрессивных вод и пассивирует сталь.

При проектировании следует руководствоваться «Указаниями по антикоррозионной защите строительных конструкций», которые учитывают условия взаимодействия внешней среды и бетона (СНиП 2.0311).

3.2. Строительные растворы

Строительные растворы – это искусственные каменные материалы, полученные затвердеванием рационально составленной смеси вяжущего, мелкого заполнителя, воды и добавок. От бетонов они отличаются, главным образом, отсутствием крупного заполнителя. Строительные растворы являются в сущности мелкозернистыми бетонами, поэтому общие закономерности, которые определяют удобоукладываемость и прочность мелкозернистых бетонов, распространяются и на растворы.

Однако имеются следующие особенности применения растворов, отличающие их от бетонов:

- а) растворы укладывают более тонкими слоями, чем бетоны;
- б) укладку растворов в отличие от бетонов производят обычно без специального механического уплотнения;
- в) растворы наносятся на пористые основания (кирпич, легкие бетоны, пористые природные камни), способные отсасывать воду;
- г) марки растворов по прочности в среднем значительно меньше, чем бетонов.

В большинстве случаев от раствора не требуется высокой прочности, так как он, как правило, применяется в тонких слоях и, например, в случае использования в качестве кладочного раствора, скрепляет между собой более прочные кирпичи и камни, причем прочность кладки в целом зависит не столько от прочности раствора, сколько от того, как он заполняет все неровности и швы в кладке, и чем тоньше слой раствора, тем более низкой может быть его прочность.

Качество применяемой растворной смеси определяется ее *удобоукладываемостью*, т.е. способностью легко распределяться по основанию тонким однородным слоем без какого-либо механического уплотнения. Поэтому удобоукладываемость растворов в большей мере, чем у бетонов, сказывается на качестве конструкции.

Удобоукладываемость раствора зависит:

- 1) от его подвижности (степени вязкости);
- 2) от его водоудерживающей способности.

Подвижность растворяемых смесей, как и бетонных, определяется дозировкой вяжущего вещества, воды и другими условиями. Так как растворные смеси чаще всего укладывают без механического уплотнения, то поэтому их обычно делают с большим водовязущим отношением и более подвижными, чем бетонные смеси.

Водоудерживающая способность – это свойство растворной смеси, благодаря которому значительно предотвращаются расслоение смеси при транспортировании и потеря значительного количества воды при укладке растворной смеси на пористое основание.

Растворные смеси содержат повышенное количество воды по сравнению с бетонными и в большей мере подвержены расслоению. Любое пористое основание отсасывает воду из растворной смеси. Последняя становится при этом менее подвижной, более жесткой. Иногда уложенный раствор настолько обезвоживается, что не хватает воды для твердения находящегося в нем цемента. При этом прочность раствора может не достичь заданной проектной величины. Бывали случаи аварий кирпичной кладки из-за указанных причин. Таким образом, применение растворов, обладающих недостаточной водоудерживающей способностью, вызывает затруднения в производстве строительных работ и отрицательно влияет на прочность конструкции. Раствор должен отдавать только избыточную воду, постепенно становясь при этом плотнее и прочнее.

В целях повышения подвижности и водоудерживающей способности применяют различные добавки. Среди них важнейшими являются тонкодисперсные минеральные вещества или наполнители (известь, золы, тонкомолотые шлаки, дисперсные отходы камнедробления).

Строительные растворы различают по виду вяжущего, плотности и назначению.

По виду вяжущего растворы делят на цементные, известковые, гипсовые и смешанные (цементно-известковые, известково-гипсовые и т.п.).

По плотности различают: *тяжелые (обычные)* растворы, с плотностью 1500...2200 кг/м³ и *легкие*, плотность которых менее 1500 кг/м³. В легких растворах обычный песок заменяют шлаковым песком или другим мелким пористым наполнителем.

По назначению растворы бывают кладочные, монтажные, штукатурные и специальные (декоративные, теплоизоляционные и т.д.).

Основными свойствами раствора в затвердевшем состоянии являются прочность, сцепление раствора с основанием, морозостойкость и др.

Прочность определяется на образцах-кубах с длиной ребра 7,07 см путем испытания на сжатие в возрасте 28 сут. Марки кладочных растворов, кгс/см²: М4, М10, М25, М50, М75, М100, М150, М200, М300.

Сцепление раствора с основанием зависит от многих факторов и, как правило, возрастает в логарифмической зависимости от прочности раствора. Поэтому более эффективное улучшение **адгезионных** свойств раствора и повышение его сцепления с основанием достигается за счет введения в состав раствора водорастворимых полимерных добавок (поливинилацетата, поливиниловых спиртов и т.п.).

По *морозостойкости* растворы делят на марки F10, F15, F25, F35, F50, F75, F100, F150, F 200, F300. Морозостойкость раствора в основном зависит от тех же факторов, что и морозостойкость бетона. Значительное повышение морозостойкости раствора достигается применением поверхностно-активных (воздухововлекающих) добавок.

Декоративные растворы применяются в качестве штукатурок и для настилки полов в качестве замены отделки природным камнем или для создания художественно-декоративного эффекта на отделываемой поверхности. В XIX в. для отделки стен большой популярностью пользовался *искусственный мрамор (штук)*, получаемый на основе цветных гипсовых растворов. В настоящее время он используется редко. Декоративные штукатурки на основе портландцемента, пигментов и различных декоративных заполнителей из-за большой трудоемкости также находят ограниченное применение. Большую популярность начали приобретать облицовочные изделия, получаемые из подобных смесей заводским методом (в виде сухих смесей). Во всех случаях они имитируют природный камень [8, 9].

Как правило, применяют готовые сухие смеси. В качестве вяжущего используется белый или цветной портландцемент. Заполнителем служит чистый кварцевый песок и каменная крошка из декоративных горных пород. Пигменты, используемые для этих целей – в основном природные, отличающиеся щелочестойкостью и высокой атмосферостойкостью. Среди декоративных штукатурок

наибольшую популярность имеют террацовые и терразитовые штукатурки, а также сграффито.

Террацовые штукатурки получают из рассматриваемых смесей путем специальной обработки затвердевшей поверхности пескоструйным методом, металлическими щетками или ударным инструментом (выбор типа обработки зависит от желаемой фактуры и вида применяемого раствора). Вместо механической обработки возможна обработка поверхности штукатурки 10 %-ным раствором соляной кислоты с последующей промывкой водой. Кислота разрушает поверхностный слой затвердевшего цемента, обнажая поверхность заполнителя.

Терразитовая штукатурка – это объемная фактура, полученная в результате циклевания. В основе этой штукатурки – гашеная известь с добавлением цемента (для прочности) и мраморной крошки, слюды или пигментов (для красоты).

Составы с заполнителем из кварцевого песка имитируют природный песчаник, вновь приобретающий популярность в строительстве в последние годы. Составы с мраморной или гранитной крошкой имитируют соответственно мрамор и гранит. При правильно подобранном цвете вяжущего создается эффект монолитного камня.

Штукатурка *сграффито* (от итал. Sgraffito – выцарапывать) – особый вид декоративно-художественной штукатурки (рис. 56). При оштукатуривании поверхности этим способом наносятся два или три накрывочных слоя различного цвета. Затем частично срезают (выцарапывают) верхний слой (или слои), создавая рельефный красочный рисунок.



Рис. 56. Декоративная штукатурка сграффито

Сухие строительные смеси – это порошкообразные композиции, состоящие из минерального вяжущего или полимерного связующего, заполнителей и наполнителей, добавок (модификаторов, полимеров, противоморозных добавок, пигментов и т.п.). На месте производства работ сухие строительные смеси (ССС) только разбавляются водой до заданной водовязущей консистенции и употребляются в соответствии с их областью применения.

Широкое применение в настоящее время ССС обусловлено расширением номенклатуры растворов, необходимостью обеспечения их качества в условиях многокомпонентности и использования малых и сверхмалых количеств химических добавок, что практически невозможно при непосредственном приготовлении растворных смесей на стройплощадке. Поэтому все большую популярность стали приобретать ССС заводского изготовления, поставляемые на стройку в расфасованном виде.

Мировая практика применения ССС насчитывает немногим более 30 лет. Для РФ их промышленное производство – сравнительно новая и интенсивно развивающаяся отрасль стройиндустрии. Развитие производства ССС в мировой практике было вызвано, прежде всего, необходимостью значительного повышения производительности труда строителей при одновременном углублении специализаций строительных работ. Для каждого их вида должны применяться свои специализированные виды растворных и бетонных смесей, приготовление которых по традиционной «мокрой» технологии далеко не всегда рационально.

ССС подразделяют на *простые* (бездобавочные) и *модифицированные*. Наличие большого числа добавок, введенных в строго необходимом количестве – одно из главных преимуществ модифицированных сухих смесей, позволяющее регулировать в достаточно широком диапазоне как строительно-технологические, так и эксплуатационные свойства растворных смесей. Использование модифицированных различными добавками сухих смесей позволяет реализовывать тонкослойные технологии при выполнении плиточных и штукатурных работ, устройстве полов, при выравнивании стен и потолков.

Модификаторы или добавки, вносимые в смесь в небольших количествах, радикально изменяют физико-химические характеристики смеси. В результате она приобретает новые, улучшенные эксплуатационные свойства. Применяют также пластификаторы, замедлители схватывания, гидрофобизаторы, пеногасители и т.п.

Целесообразность использования ССС, как материала полной заводской готовности, подтверждена зарубежной и отечественной практикой строительства. Область применения ССС обширна: выполнение бетонных, штукатурных, кладочных, плиточных работ, устройство покрытий полов, заделка стыков.

Мировой и отечественный опыт использования сухих смесей показал их высокую эффективность и преимущества по сравнению с традиционными методами проведения работ:

- повышение производительности труда в 2...5 раз в зависимости от вида работ, механизации, транспортировки и т.д.;
- снижение материалоемкости по сравнению с традиционными технологиями в 3...10 раз в зависимости от вида работ;
- стабильность составов и, как следствие, повышение качества строительных работ;
- длительность срока хранения без изменения свойств и расхождение по мере необходимости;
- возможность транспортирования и хранения при отрицательных температурах;
- сокращение отходов растворов в среднем на 5...7 % [33].

В настоящее время в мире выпускается широкая номенклатура сухих смесей для различных видов строительных работ. Как показала строительная практика последних лет, сухие смеси нашли применение во всех отраслях промышленности, связанных с применением вяжущих веществ.

Промышленность выпускает широкий ассортимент ССС, которые в соответствии с их назначением можно разделить на несколько групп. Каждая из этих групп объединяет довольно большое число смесей, отличающихся спецификой свойств и областей применения [32].

Кладочные смеси по объемам производства занимают ведущее место. В их качестве могут быть использованы обычные цементно-песчаные растворы марок от 100 до 200, содержащие минеральные или органические пластификаторы и тонкодисперсные минеральные добавки (золы ТЭС, молотые известняки, микрокремнезем и т.п.). Пластификаторы обеспечивают удобоукладываемость таких растворных смесей при укладке на пористое основание и способность растворной смеси удерживать воду. С помощью тонкодисперсных добавок достигается заданная прочность раствора. Для зимних кладочных работ используют противоморозные добавки.

Штукатурные смеси. Представлены очень широкой гаммой строительных смесей: от тривиальных цементно-песчаных растворов с лимитированной крупностью песка до сложных декоративных систем,

модифицированных полимерами, пигментированных, с декоративными заполнителями, приближающиеся к фактурным окрасочным составам.

В зависимости от вида вяжущего используют гипсовые и цементные штукатурные сухие смеси. Для внутренних работ в помещениях с нормальным влажностным режимом применяют гипсовые смеси. Их преимущества:

- быстрое твердение (время полного затвердевания – 2...4 ч);
- отсутствие усадочных деформаций (как известно, гипс при твердении немного расширяется);
- возможность получения высококачественных покрытий в температурно-влажностных условиях, вызывающих быстрое высыхание смеси;
- светлый тон штукатурки облегчает последующую окраску;
- высокая паропроницаемость и создание в помещении благоприятного микроклимата.

Цементные штукатурные смеси производятся на основе цемента со специальными добавками, обеспечивающими тонкий слой нанесения растворной смеси, пластичность, высокую водоудерживающую способность. Это дает возможность их нанесения тонким слоем, причем однослойно, так как постоянное присутствие в штукатурном слое воды способствует реакции гидратации цемента, в результате которой штукатурка набирает требуемую прочность и обеспечивает прочное сцепление с основанием. Цементные смеси применяют, как правило, для проведения наружных работ и оштукатуривания стен в помещениях с повышенной влажностью.

Шпатлевочные смеси. Одним из главных показателей качества отделываемой поверхности является гладкость и отсутствие видимых дефектов (трещин, раковин), которые особенно ярко проявляются после окраски. Поэтому, для подготовки поверхности под окраску, т.е. для ликвидации дефектов этой поверхности используют *шпатлевки* (от нем. Spatel – лопатка).

Современные строительные шпатлевки, выпускаемые в виде сухих смесей, – это многокомпонентные системы, в основе которых лежит либо минеральное вяжущее (гипс, цемент), либо полимерное связующее. В шпатлевках на минеральном вяжущем обязательно присутствует полимерный модификатор (второе вяжущее) – релаксируемые порошкообразные сополимеры винилацетата. Роль полимерного связующего заключается в обеспечении адгезии шпатлевки к основанию и формировании прочной структуры шпатлевки после ее нанесения.

Наполнитель в шпатлевках более тонкодисперсный, чем в шпугатурных смесях (размер частиц не более 0,2...0,3 мм). В роли наполнителя используются карбонатные породы (известняк, мрамор) и мелкие пески. Наиболее распространены гипсовые шпатлевки, их преимущество – безупадочность, исключающая образование трещин. Но использовать их можно только в помещениях с сухим режимом эксплуатации.

Клеевые смеси. В последние годы для отделки фасадов, интерьеров и настилки полов все шире используются плиточные материалы: керамические и из природного камня. Поэтому клеевые смеси наряду со шпатлевочными – одни из самых популярных видов ССС. Сухая клеевая смесь для плиточных работ особенно удобна тем, что ее можно готовить небольшими порциями.

Важной проблемой при облицовке зданий керамической плиткой является повышение прочности сцепления плитки с поверхностью стены. Одними из эффективных в этом плане материалов рекомендовали себя *адгезивы* – клеевые композиции. Для этого в состав ССС, применяющихся в качестве плиточных клеев, вводят порошкообразные полимеры (поливинилацетаты и эфиры целлюлозы). Как показала практика, такие клеевые композиции являются более эффективными по сравнению с обычными цементно-песчаными растворами. Толщина слоя клея составляет 5...7 мм (у цементно-песчаного раствора – 1...2 см) при сравнительно низком расходе (7...9 кг на 1 м² поверхности). Адгезионная прочность составляет 5...10 МПа, что существенно выше, чем у цементно-песчаных растворов.

Смеси для полов. В современных зданиях и сооружениях пол представляет собой горизонтальную многослойную конструкцию, каждый слой которой имеет определенное функциональное значение. Полы должны иметь высокие показатели качества по прочности, деформативности, истираемости, трещиностойкости, коррозионной стойкости и декоративности. На основе ССС разработаны специальные бетонные смеси и пескобетоны для устройства оснований пола. В их состав входят высококачественный цемент, обогащенный песок, фракционированный гранитный щебень (гравий) с комплексом химических добавок, обеспечивающих высокие эксплуатационные и строительные-технологические показатели затвердевших покрытий. Они отличаются высокой механической прочностью, ударостойкостью, низкой истираемостью, стойкостью к агрессивным средам, водонепроницаемостью.

Сухие смеси для полов могут быть двух типов:

- смеси для устройства стяжек;
- смеси для устройства лицевого покрытия пола.

Задачи, выполняемые материалом стяжки, – выравнивание основания пола под лицевое покрытие и передача нагрузки от покрытия к основанию. Смеси, используемые как лицевое покрытие, кроме того, должны обладать низкой пористостью, высокими прочностными свойствами и износостойкостью.

Для полов эффективны самовыравнивающиеся смеси, которые после затворения водой и интенсивного перемешивания, благодаря совместному действию системы пластифицирующих и водоудерживающих добавок, обладают свойствами «жидкого тела». Они могут растекаться под действием собственной массы, образуя ровную горизонтальную поверхность. При этом у них не наблюдается *седиментации* – расслоения с выделением воды на поверхности и оседанием заполнителя.

В смесях для стяжек в качестве вяжущего применяют портландцемент и гипс, а для лицевых покрытий – портландцемент или глиноземистый цемент. Для покрытий полов эффективны безусадочные смеси. Использование полимерных модификаторов обеспечивает высокую износостойкость пола [1].

Гидроизоляционные материалы – используются бетоны повышенной водонепроницаемости или применяется пропиточная гидроизоляция ограждающих конструкций. Для получения бетонов повышенной водонепроницаемости применяют расширяющийся или напрягаемый цементы. Использование последнего позволяет также существенно повысить морозостойкость (до 500 циклов и выше) и в 3...6 раз долговечность железобетонных конструкций.

Принцип действия пропиточной гидроизоляции основан на проникновении в бетон химически активных элементов по капиллярным порам, с последующим химическим взаимодействием со свободной известью и конденсацией на поверхности пор. Существует также обмазочная гидроизоляция, т.е. на поверхность бетона наносится гидроизоляционный слой.

Красочные составы. Применение красочных составов в виде сухих смесей позволило повысить качество и экономичность отделочных покрытий. Порошковые полимерные краски применяются в различных отраслях промышленности. Они представляют собой мелкодисперсные сухие смеси, состоящие из твердых полимеров, наполнителей, пигментов и специальных добавок. Красочные покрытия, нанесенные такими составами, отличаются высокой

долговечностью, стойкостью к атмосферным воздействиям, не выцветают и могут придавать различные цветовые оттенки (рис. 57).



Рис. 57. Настенные декоративные покрытия на основе красочных составов сухих строительных смесей

Расширение применения ССС – еще один шаг в современной технологии строительства, направленной на повышение качества и надежности строительных работ.

3.3. Асбестоцементные материалы и изделия

Открытие асбестоцемента относится к началу XX в. В 1901 г. австрийский инженер Людвиг Гатчек запатентовал свое изобретение на способ изготовления асбестоцементных плит. Плиты, изготовленные из асбеста и цемента, были исключительно долговечны, причем прочность их со временем не снижалась, а даже возрастала. Это открытие послужило началом становления новой отрасли промышленности – асбестоцементной. В асбестоцементе наиболее полно использовались исключительно ценные свойства асбеста: высокая механическая прочность, эластичность, термостойкость.

В 1908 г. Россия приобрела лицензию на патент Л. Гатчека и начала производить асбестоцемент. Первый в России завод по производству асбестоцементных изделий был построен в 1910 г. в г. Брянске. Затем аналогичное производство было организовано в Ростове и Вольске.

Вначале формовали асбестоцементные плитки размером 30×30 и 40×40 см. Плитки использовались для кровли зданий наряду с плитками из естественного сланца (шифера) и назывались поэтому *шиферными плитками*. Шиферной называлась и промышленность, выпускающая их.

Интенсивность асбестоцементной промышленности началась с 20-х годов XX в., а с середины 60-х годов СССР прочно занял по производству асбестоцементных изделий первое место в мире. Это место наследница СССР, РФ продолжает занимать в мировой практике производства асбестоцементных изделий и в настоящее время.

3.3.1. Сырьевые материалы и технологические принципы производства асбестоцементных изделий

Асбест. Асбестом называют разновидности минералов волокнистого строения, относящиеся к серпентиновой или амфиболовой минералогическим группам. Эти минералы, состоящие из кристаллических агрегатов нитевидной формы, способны расщепляться на очень тонкие волокна (рис. 58).

По химическому составу асбестовые минералы являются водными силикатами магния, железа и натрия. Практическая ценность асбестовых минералов определяется их волокнистым строением, а также такими свойствами асбестовых волокон, как эластичность, высокая прочность на растяжение, способность при механических воздействиях расщепляться на тончайшие волокна, выдерживать высокие температуры без существенного изменения физических свойств, химическая стойкость, огнестойкость. Волокнистое строение наиболее ярко выражено у асбеста серпентиновой группы – *хризотил-асбеста*. Его доля в мировой добыче асбеста составляет около 96 %. Химический состав хризотил-асбеста выражается формулой $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.



Рис. 58. Хризотил-асбест

Асбест вводится в асбестоцемент для повышения прочности при растяжении. Прочность при растяжении асбеста вдоль волокон относится к его главным механическим характеристикам. Она достигает 600...800 МПа, что сравнимо с лучшими марками стали. Кроме того, хризотил-асбест имеет высокую щелочестойкость, что

обеспечивает его сохранность в твердеющем порландцементном камне и монолитность асбестоцементной композиции.

Цемент. Прочность асбестоцемента, являющаяся важнейшим показателем его качества, в значительной степени определяется

прочностью входящего в его состав цементного камня. Портландцемент для асбестоцементных изделий (АЦИ) выпускают двух марок: М400 и М500. Содержание C_3S должно быть не менее 52 %, а C_3A не должно превышать 8 %. Повышенное содержание C_3S необходимо для повышения прочности. Ограничение количества C_3A принято потому, что более высокое его содержание ухудшает фильтрационные свойства асбестоцементной массы и уменьшает производительность формовочных машин. В цементе для производства АЦИ допускается содержание не более 3 % добавок, улучшающих его свойства, но в основном применяют бездобавочный портландцемент. Кроме высокой прочности портландцемент для АЦИ должен обладать хорошей **адгезией** к поверхности асбестового волокна, оптимальной скоростью гидратации, малой водоудерживающей способностью и замедленными сроками схватывания.

Высокая адгезия гидратирующихся цементных частиц к поверхности асбестового волокна необходима для получения однородной асбестовой суспензии, не расслаивающейся в результате седиментации цементных зерен в процессе ее последующей переработки. Понижение водоудерживающей способности цемента необходимо для эффективного удаления влаги в процессе формования асбестоцементного слоя и наката в целом.

Начало схватывания портландцемента для производства АЦИ должно наступать не ранее 1 ч 30 мин, а конец – не позднее 12 ч. Время от момента затворения до начала схватывания должно быть достаточным для качественного выполнения операций волнирования или прессования асбестоцементных листов.

Наряду с обычным портландцементом в производстве АЦИ используется еще и песчанистый портландцемент, содержащий 25... 40 % кварцевого песка. АЦИ на основе такого цемента твердеют только в условиях автоклавной обработки, что повышает энергозатраты на их производство. Вместе с тем, производство АЦИ на основе песчанистого цемента позволяет значительно сократить расход портландцементного клинкера. Изделия из такого вяжущего после автоклавной обработки не требуют дальнейшей выдержки на складе (складского созревания) и могут быть сразу отгружены потребителю. Кроме того, механическая прочность таких изделий на 20 % превышает прочность изделий, изготовленных на обычном портландцементе и твердеющих в нормальных условиях. Изделия на основе песчанистого цемента более устойчивы к действию минерализованных вод [35].

Кроме основных материалов в состав асбестоцементных смесей вводят различные добавки, улучшающие технологические свойства смесей, а также пигменты и красители.

Технологические особенности производства. Технология производства АЦИ включает составление смесей из асбеста различных марок, его распушку на отдельные волокна, приготовление асбестоцементной суспензии, формование листов или труб на специальных формовочных машинах, твердение отформованных изделий (в пропарочных камерах, автоклавах, водных бассейнах, утепленных складах) и их механическую обработку (обрезку, обточку кромок и т.п.).

При механической обработке асбест сравнительно легко расщепляется на тонкие волокна, обладающие гибкостью, высокой механической прочностью, несгораемостью. В результате распушки асбеста резко увеличивается поверхность его волокон. По этой причине асбест обладает высокой адсорбционной активностью по отношению к портландцементу.

При смешивании асбеста с портландцементом и водой волокна асбеста равномерно распределяются в массе цемента, при этом отдельные волокна оказываются окружены цементным тестом. Адсорбируя выделяющийся при твердении цемента гидроксид кальция и другие продукты гидратации цемента, асбест уменьшает их концентрацию в растворе. В результате этого схватывание и твердение цемента ускоряется, он напрочь связывается с волокнами асбеста. Вследствие дальнейшей кристаллизации продуктов гидратации цемента прочность связи волокон асбеста с вяжущим компонентом в АЦИ нарастает.

Отделку изделий можно осуществлять в процессе формования (применением пигментов или цветных цементов, тиснением рельефа на лицевой поверхности) или при получении готовых изделий (окраска, покрытие декоративным слоем, полировка).

3.3.2. Свойства асбестоцемента

Асбестоцемент относится к классу материалов, которые называются *композиционными*. В асбестоцементе роль матрицы выполняет цементный камень, а волокна асбеста – роль арматуры. Введение асбеста в матрицу приводит к получению нового материала, свойства которого отличны как от свойств самой матрицы, так и арматуры, взятых отдельно.

Механические свойства асбестоцементного материала выявляются при рассмотрении его поведения под нагрузкой. Самым важным видом нагрузки для асбестоцемента является его растяжение, для восприятия которого и производится армирование цементного камня асбестом. В асбестоцементе асбестовое волокно армирует материал по всему объему, т.е. получается дисперсно-армированный бетон (*фибробетон*).

Прочность асбестоцемента зависит от свойств сырьевых материалов – цемента, асбеста, от технологических условий изготовления, длины волокон асбеста, плотности, влажности. Прочность асбестоцемента растет во времени вследствие продолжающейся гидратации клинкерных минералов и карбонизации продуктов гидратации. Как показали исследования, нарастание прочности асбестоцемента продолжается в течение 20 лет. Правда, интенсивность роста прочности наблюдается в первые 90 сут твердения, далее она нарастает незначительно.

Асбестоцемент обладает высокими прочностными показателями, его прочность при изгибе достигает 30 МПа, при сжатии – 90 МПа.

АЦИ по толщине имеют выраженную в той или иной степени слоистость. Прочность сцепления между слоями значительно ниже прочности самого материала. Это определяет специфический характер разрушения асбестоцемента в виде расслоения под влиянием различных агрессивных воздействий. В этом выражена анизотропность его структуры [35].

Плотность, пористость, водопоглощение. Затвердевший асбестоцемент состоит из нескольких компонентов, отличающихся по плотности: зерен цементного клинкера, гидратирующихся с поверхности; цементного камня; волокон асбеста. Плотность асбестоцемента в целом зависит от плотности и относительного содержания указанных компонентов. Величина плотности асбестоцемента связана со степенью гидратации вяжущего. По мере увеличения глубины гидратации цементных зерен в асбестоцементе, его поры заполняются гидратными новообразованиями и масса асбестоцемента в высушенном состоянии растет за счет химического связывания воды. В нормальных условиях это увеличение массы при твердении происходит без изменения объема материала, и поэтому плотность асбестоцемента с возрастом увеличивается.

Кроме гидратации цемента увеличение массы асбестоцемента во времени вызывает карбонизация имеющейся в твердеющем цементном камне извести за счет присоединения углекислоты из воздуха. Плотность асбестоцемента, как и любого другого материала, зависит

от пористости. Последняя во многом определяется условиями формирования и тепловлажностной обработки изделий. С пористостью тесно связана величина водопоглощения. Водопоглощение асбестоцемента с возрастом уменьшается и к трем месяцам составляет 90 % водопоглощения в семисуточном возрасте.

Средняя плотность асбестоцемента составляет 1600...1900 кг/м³.

Асбестоцемент подвергается *короблению* (изгибу концов листа при одностороннем увлажнении). Причиной коробления является набухание части листа с одной смачиваемой стороны. Эта часть листа удлиняется, в то время как длина сухой части листа остается неизменной. Лист изгибается с образованием выпуклости, обращенной в сторону смоченной поверхности. Поскольку причиной коробления является одностороннее набухание, то коробятся все материалы, способные к набуханию, а не только асбестоцемент. Коробление асбестоцементного листа может происходить и в случае его одностороннего нагревания солнечными лучами в наружных конструкциях или тепловыми приборами при внутренних [34].

Коробление листов весьма опасно в асбестоцементных облицовках и конструкциях, особенно если листы закрепляются жестко. При короблении нарушается крепление, но чаще разрушается лист в месте крепления, поэтому асбестоцементные листы, используемые для облицовки и в конструкциях, должны иметь податливые крепления.

Значительное снижение величины коробления (до 30...40 %) дает прессование листов. Снижают коробление применение песчанистого цемента (с запаркой в автоклаве), увеличение плотности листов, использование длиноволокнистого асбеста. Однако самым радикальным средством является гидрофобизация листов, снижающая их водопоглощение и величину коробления. Для гидрофобизации могут быть использованы кремнийорганические соединения, мылонафт, стеарино-парафиновые **эмульсии** и другие химические добавки.

Гигроскопичность асбестоцемента достигает 8...12 %, уменьшаясь с повышением плотности листа.

Теплофизические свойства. Удельная теплоемкость асбестоцемента составляет в среднем 0,94 кДж/(кг·град). Ввиду того, что удельные теплоемкости асбеста и продуктов гидратации цемента близки по величине, удельная теплоемкость асбестоцемента мало изменяется от соотношения между асбестом и цементом. Теплопроводность же существенно изменяется в зависимости от плотности и содержания асбеста. При наибольшей плотности (1900 кг/м³) и естественной влажности, теплопроводность равна

0,35 Вт/(м·К), т.е. является довольно низкой. Асбестоцемент отличается также высокой теплостойкостью, он способен выдержать длительную эксплуатацию при 250°C [35].

При нагревании до 250°C и охлаждении прочность асбестоцемента даже возрастает на 10...20 %. При нагреве до 300°C и охлаждении прочность снижается весьма незначительно. Существенное снижение прочности наблюдается только при нагреве выше 400°C.

Морозостойкость. Главное влияние на морозостойкость асбестоцемента, как и других материалов на цементном вяжущем, оказывает величина пористости и размер пор. Асбестоцемент является довольно морозостойким композиционным материалом – через 25...50 циклов он теряет от 10 до 15 % первоначальной прочности. Разрушение асбестоцементных листов при многократном замораживании и оттаивании начинается с расслоения. Это означает, что самыми слабыми являются обедненные цементом граничные области слоев. Морозостойкость асбестоцемента повышается с увеличением длины волокон асбеста. В несколько раз повышает морозостойкость гидрофобизация асбестоцементных листов.

Стойкость асбестоцемента в агрессивных средах. Агрессивные газы и жидкости по отношению к асбесту и цементному камню являются агрессивными и для асбестоцемента. Для асбестоцемента опасны кислоты, в том числе кислая среда, образующаяся в порах при воздействии на материал газов, содержащих SO₃.

Асбестоцемент подвержен всем видам агрессивных воздействий, характерным для цементного камня. Опасно фильтрование в асбестоцемент очень мягкой воды, растворяющей Ca(OH)₂ и другие соединения (выщелачивание). Взаимодействие минерализованных вод с гидроксидом и гидроалюминатом кальция в асбестоцементе может также привести к его коррозии.

Агрессивные среды менее опасны для асбестоцемента высокой плотности, поры которого ввиду своих малых размеров труднодоступны для проникновения вредных веществ как в виде газов, так и в виде жидкостей.

Долговечность и надежность АЦИ зависят как от качества самого асбестоцемента, так и от условий его эксплуатации и определяются сроком эксплуатации. В результате исследования большого числа шиферных кровель установлено, что максимальный процент амортизации кровель относится к 30-летнему сроку их эксплуатации, т.е. амортизация асбестоцемента в кровлях за десятилетия их службы невелика, что свидетельствует о значительной долговечности

асбестоцемента. Он может служить без снижения своих физико-механических свойств более 50 лет.

Универсальность асбестоцемента подтверждают области его применения и, в частности, как декоративного материала, не требующего специальных мер по уходу за ним. Это весьма ценное свойство, которое привлекают к нему внимание архитекторов, художников и дизайнеров.

3.3.3. Виды АЦИ и их эффективность

Асбестоцемент получил широкое применение как один из наиболее эффективных материалов для изготовления различных строительных деталей и конструкций. Цементный камень хорошо сопротивляется сжимающим и плохо растягивающим нагрузкам: прочность при растяжении в среднем составляет 7...8 % от прочности при сжатии. Введение в цемент небольшого количества (10...20 %) тонковолокнистого асбеста существенно изменяет физико-механические свойства цементного камня, в котором волокна асбеста, обладающие высокой прочностью при растяжении, воспринимают растягивающие напряжения, а цементный камень – сжимающие. Такой материал обладает и другими ценными свойствами: огнестойкостью, долговечностью, малой водонепроницаемостью, высокими электроизоляционными свойствами. Однако вследствие повышенного содержания цемента усадочные и влажностные деформации АЦИ в 2...3 раза выше, чем у бетонов. Их недостаток также – недостаточное сопротивление удару и уже упомянутое коробление.

Номенклатура АЦИ насчитывает свыше 40 наименований. Это профилированные листы – волнистые и полуволнистые, для кровель и обшивки стен; плоские плиты – обыкновенные и офактуренные или окрашенные – для облицовки стен; панели кровельные и стеновые с теплоизоляционным слоем; трубы напорные и безнапорные и соединительные муфты к ним; разнообразные специальные изделия (асбестоцементные зонты для метрополитена, оконные сливы, подоконники, фасонные детали, конструкции для торговых павильонов и т.п.).

Асбестоцементные волнистые листы – основной вид листовых АЦИ (рис. 59). Их еще называют шиферными (от нем. Schiefer – кровельный сланец). В зависимости от размера и несущей способности они используются для кровельных покрытий в жилых, общественных и промышленных зданиях, а также в качестве ограждающих конструкций неотапливаемых промышленных зданий, складов,

галерей и т.д. Доля шифера в общем объеме производства кровельных материалов, производимых в РФ, – около 50 %.



Рис. 59. Асбестоцементные волнистые листы естественного цвета (слева) и окрашенные (справа)

Кровельные листы выпускают шести- и семиволновые: длина 1750 мм; ширина 980 мм (семиволнового); толщина 5,8...7,5 мм. Первоначально шифер выпускали в виде плоских листов размером 40×40 см (отсюда и пошло название). Асбестоцементные листы имеют прочность при изгибе 16,0...19,0 МПа; при растяжении – 8,8...11,2 МПа; при сжатии – 24,5...31,4 МПа, их средняя плотность составляет 1600...1700 кг/м³, масса – 9...10 кг, морозостойкость – 25...50 циклов.

Кроме обычных, выпускают листы, окрашенные атмосферостойкими красками как в массу, так и с поверхности. В последнее время начался выпуск плоских листов с фигурной кромкой, имитирующих мелкоштучную черепицу. Долговечность асбестоцементных кровель – до 50 лет.

В опытно-промышленном масштабе изготавливаются крупноразмерные листы двойной кривизны длиной до 5 м. Из таких листов строят транспортные галереи, летние домики. Опыт применения листов двойной кривизны показал их высокую эффективность.

К волнистым кровельным листам дополнительно выпускают различные фасонные детали: коньковые с волнистой поверхностью, коньковые упрощенные, переходные и угловые детали.

Асбестоцементные плоские листы и плиты для сборных конструкций и облицовки. Для современного промышленного строительства особое значение имеют плоские асбестоцементные

крупногабаритные листы для сборных строительных конструкций и облицовки. Они имеют размеры по длине до 2,8 м, ширине до 1,6 м и толщине 4...12 мм. Плоские асбестоцементные листы необходимы для сборных утепленных конструкций (плит и панелей) для нужд промышленного и гражданского строительства. Плоские листы применяют для наружной и внутренней облицовки стен, балконных ограждений. Из плоских листов монтируют асбестоцементные конструкции, к которым относятся: утепленные плиты для кровель промышленных зданий; навесные стеновые панели для стен жилых, общественных и промышленных зданий; плиты подвесных потолков.

Асбестоцементные облицовочные плиты с различной отделкой лицевой поверхности предназначены для облицовки стен, лестничных клеток и маршей, коридоров, вестибюлей, кинотеатров, магазинов, клубов, поликлиник, станций метро и т.п. Облицовка асбестоцементными эмалированными плитами значительно дешевле, чем отделка керамическими глазурованными плитками, меньше и затраты труда. Асбестоцементные плиты обладают хорошей износостойкостью, легко обрабатываются столярными и слесарными инструментами. Плиты к стенам крепят приклеивающими мастиками, шурупами или профилированными раскладками.



Асбестоцементные листы и плиты выпускают в основном двух типов – прессованные (П) и непрессованные (НП) с обычной окрашенной или офактуренной лицевой поверхностью (рис. 60). Производятся также перфорированные плиты для акустических потолков, швеллеры, утепленные плиты и панели.

Рис. 60. Асбестоцементные плоские листы и плиты

Утепленные плиты покрытый выпускают марок АП. Они утеплены минеральной ватой и предназначены для укладки под рулонный ковер в покрытия промышленных зданий с относительной влажностью воздуха внутри помещений до 70 %. Эти плиты просты по конструкции, имеют хорошие эксплуатационные свойства, невысокие массу и стоимость.

Плиты каркасного типа (АКП) состоят из двух асбестоцементных листов толщиной 10 мм, соединенных клеем или шурупами с каркасом из асбестоцементных швеллеров. В полость плиты помещают утеплитель, над которым образуется вентилируемое воздушное

пространство. Плиты предназначены для укладки в покрытия промышленных и сельскохозяйственных зданий. Они эффективны для покрытий зданий с большими пролетами и стальными несущими конструкциями особенно в районах повышенной сейсмичности.

Окрашенные отделочные листы. Обычный серый цвет АЦИ определяется цветом основного входящего в их состав компонента – портландцемента. Асбестоцементным изделиям, используемым для декоративного оформления фасадов зданий, кровель, отделки интерьеров, можно придавать различные цветовые оттенки. Для этого существуют различные способы производства окрашенных асбестоцементных листовых изделий. Первый способ (наиболее простой и старый) подразумевает окрашивание в процессе формования. При этом асбестоцементную массу получают на основе цветных цементов или добавлением в нее тонкомолотого минерального пигмента. В этом случае изделие получается окрашенным по всей массе. Как правило, цветные цементы очень редко используются в асбестоцементной промышленности из-за высокой дороговизны производства, поэтому чаще всего идут по пути использования красящих пигментов.

Пигменты, применяемые для окраски асбестоцементных листов, должны быть щелочеустойчивы, атмосферостойки, обладать достаточной интенсивностью цвета, не должны вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации портландцемента, выцветать во времени и т.п. Исходя из этих требований в асбестоцементной промышленности для окрашивания изделий преимущественно применяют окись хрома (зеленый цвет) и железистоокисный пигмент (красный цвет). Кроме того, используется сурик желтый, редоксайд (железистоокисный), природная охра, ультрамарин, сажа нефтяная, графит аморфный.

Другим, не менее распространенным способом, является поверхностное окрашивание затвердевших асбестоцементных листов. Подобное окрашивание производят с помощью различных красителей – лаков, эмалей, синтетических и силикатных красок. Окрашивающий слой наносят разными способами: пульверизацией, наливным способом и с помощью окрашивающих валиков. Перед окраской поверхность листов шлифуют (зачищают), обеспыливают, обезжиривают и в необходимых случаях покрывают специальной шпатлевкой.

Среди перечисленных способов наиболее распространен наливной, так как он обеспечивает равномерность окрашивания поверхности

листа и минимальные потери красящего состава. На рис. 59 приведены образцы окрашенных асбестоцементных листов.

Асбестоцементные стеновые панели – перспективный вид АЦИ. Они имеют длину 3...6 м, ширину 0,6 м и толщину от 60 до 120 мм. Такие панели выпускают многопустотными с заполнением пустот теплоизоляционными материалами (минеральной ватой, пеноплитами и т.п.). Их эффективно использовать для стен и покрытий промышленных и сельскохозяйственных зданий, спортивных сооружений и т.п. (рис. 61).

Декоративные АЦИ могут быть офактуренными, либо окрашенными в процессе формования или в затвердевшем виде.

К первой группе относятся листовые изделия с рельефной поверхностью. Они бывают окрашенными как по всей толщине, так и с окрашенным поверхностным слоем белым и цветным цементами, минеральными красками, синтетическими красителями, а также с помощью цветных посыпок (окрашенного песка, цветного стеклопорошка и т.п.). Листы с рельефной поверхностью применяют для ограждений балконов и лоджий, устройства летних павильонов, облицовки лестничных клеток и вестибюлей.

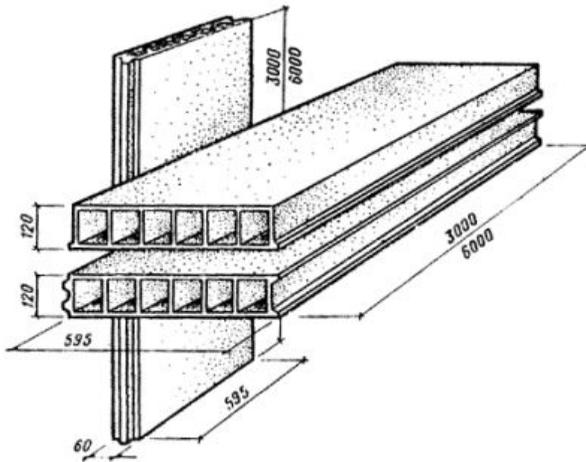


Рис. 61. Асбестоцементные стеновые панели

Вторая группа декоративных листов разделяется на три вида: окрашенные составами на неорганических связующих; окрашенные синтетическими эмалями и красками; с пленочным покрытием (рис. 62, а). Такие листы применяются для наружной и внутренней облицовки зданий, ограждения балконов и лоджий.



Рис. 62. Асбестоцементный лист с пленочным покрытием (а) и асбестоцементные трубы (б)

Щогонажные изделия – швеллеры, подоконные плиты, сливы, раскладки и элементы парапетов. Швеллеры применяются для изготовления каркасов стеновых панелей и плит покрытий.

Асбестоцементные трубы применяют для устройства водопроводов, канализации, нефте- и газопроводов, дренажа, дымовых и вентиляционных каналов, мусоропроводов, прокладки телефонных, телеграфных, осветительных и других кабелей.

По сравнению с металлическими асбестоцементные трубы имеют ряд преимуществ. Они в 3...4 раза легче по массе, в 2...4 раза дешевле, не подвергаются разрушению блуждающими в земле токами, которые часто выводят из строя металлические трубы; более стойки против действия минерализованных вод. Трение воды по стенкам этих труб меньше, чем у металлических, что увеличивает их пропускную способность. Теплопроводность асбестоцементных труб значительно меньше, чем металлических. Высокая теплозащитная способность асбестоцементных труб дает возможность укладывать их на меньшей глубине, чем металлические, не опасаясь замерзания воды. Асбестоцементные трубы способны выдерживать давление до 1,2 МПа и выше. Существенным недостатком асбестоцементных труб является их хрупкость.

Асбестоцементные трубы выпускают *безнапорные* и *напорные* (рассчитанные на высокое давление). Они отличаются толщиной и прочностью (рис. 62, б).

Водопроводные (напорные) трубы выпускают с рабочим давлением от 0,3 до 1,2 МПа марок: ВТ-3, ВТ-6, ВТ-9, ВТ-12, ВТ-15 (цифра указывает, на какое максимальное давление в атмосферных единицах рассчитана труба). Длина труб – 3, 4 и 6 м, внутренний диаметр от 100 до 500 мм. Выпускают также газопроводные (с давлением газа не более 0,5 МПа) и канализационные асбестоцементные трубы (с давлением не ниже 0,4 МПа). Особенно эффективны напорные асбестоцементные трубы для прокладки теплотрасс.

Безнапорные трубы имеют диаметр 100 и 150 мм, длину от 3 до 6 м и используются для ненапорных канализационных стоков, прокладки кабелей, дренажных коллекторов, дымоходов, а также столбов для оград.

Для соединения асбестоцементных труб служат специальные асбестоцементные муфты с резиновыми прокладками. На рис. 63 показана муфта асбестоцементная самоуплотняющаяся типа САМ, применяемая при строительстве напорных водопроводов. Эффект самоуплотнения такой муфты достигается благодаря давлению воды в трубопроводе. Давление передается на ступени цилиндрических углублений в манжетах и плотно прижимает их к уплотняемым поверхностям труб и муфт. Это обеспечивает герметичность стыка.



Рис. 63. Самоуплотняющаяся асбестоцементная муфта (справа) и принцип соединения труб с ее помощью (слева)

Важным свойством для асбестоцементных труб является высокая биостойкость. Асбестоцемент не содержит и не выделяет никаких веществ, стимулирующих рост бактерий. В этом отношении он ведет себя как стекло. То есть асбестоцементные трубы стерильны для транспортирования питьевой воды.

Изделия специального назначения. Кроме описанных выше изделий из асбестоцемента изготавливают целый ряд специальных изделий для строительства: акустические плиты, вентиляционные короба, полуцилиндры для покрытий теплоизоляционных слоев на трубопроводах, асбестоцементные электроизоляционные доски

(АЦЭИД), а также изделия так называемых малых форм – подоконники, оконные сливы и т.п.

Для отделки общественных зданий в качестве *акустических плит* для облицовки потолков используются перфорированные асбестоцементные листы, обладающие не только акустическими, но и хорошими декоративными свойствами. Их применяют как самостоятельно, так и в сочетании с другими звукоизоляционными материалами. В акустических потолках эти плиты служат экранами, а звукоизоляционные функции выполняют закрываемые ими стекловолоконистые или минераловатные звукоизолирующие слои. Поверхность акустических перфорированных листов покрывают декоративным слоем. Акустические плиты из асбестоцемента прочны, красивы, просты в обслуживании, легко монтируются, негоряемы и не подвержены гниению.

На *электроизоляционных досках* АЦЭИД монтируют электрооборудование (асбестоцемент обладает высокими электроизоляционными свойствами). Для вентиляционных каналов используют специальные *вентиляционные короба*. Они имеют прямоугольную форму в виде коробок с размером в сечении от 15×15 до 40×40 см. Асбестоцементные вентиляционные короба применяют для устройства систем вентиляции и кондиционирования воздуха производственных, общественных, жилых и других помещений.

В качестве защитного покрытия теплоизоляционного слоя на трубопроводах применяют асбестоцементные *полуцилиндры (скорлупы)*. Защитный слой образуют два полуцилиндра. Из асбестоцемента изготавливают элементы сборных *водозащитных устройств* для метрополитена. Они предназначены для отвода воды, которая может проникать через основную несущую оболочку.

Из асбестоцемента изготавливают подоконники, заменяющие деревянные или железобетонные. Им можно придавать различную декоративную фактуру. Применяют также асбестоцемент при изготовлении цветочниц, различных скульптурных изделий, для отделки фасадов, балконов и галерей, различных павильонов.

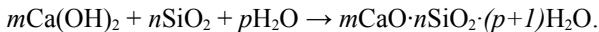
Эффективность применения асбестоцемента в строительстве определяется путем сравнения стоимости, материалоемкости и трудоемкости конструкций, изготовленных из асбестоцемента и других материалов. Наиболее целесообразна замена железобетонных плит покрытий в промышленных зданиях и железобетонных стеновых панелей в жилых, общественных и промышленных зданиях асбестоцементными плитами покрытий и панелями. При этом снижается масса конструкций в 3...5 раз, расход металла –

на 2...3 кг/м³, трудоемкость монтажных работ – в 2 раза, стоимость конструкций – на 15...20 %. Сокращаются и сроки строительства объектов. Широкое применение в строительстве различных асбестоцементных изделий и конструкций из них способствует индустриализации строительства, снижению расходов на возведение зданий и сооружений и значительно расширяет архитектурные возможности современного градостроительства.

3.4. Силикатные автоклавные материалы

Первым, кто получил достаточно водостойкий и прочный материал на основе извести и песка, был немецкий ученый В. Михаэлис, который в 1880 г. предложил обрабатывать известково-песчаную смесь в атмосфере насыщенного водяного пара при температуре 150...200°C. Открытие Михаэлиса было использовано для производства так называемого силикатного (известково-песчаного) кирпича. К началу XX в. в России было уже 5 заводов, выпускающих силикатный кирпич, а в настоящее время этот материал занял такое же место в ряду строительных материалов, как и керамический кирпич.

Обработка отформованной в виде кирпича известково-песчаной массы производится в специальных агрегатах, называемых *автоклавами*. Автоклавы – толстостенные стальные цилиндры диаметром до 2 м и длиной до 20 м с герметично закрывающимися крышками. В автоклаве в среде насыщенного водяного пара при давлении 0,8...1,0 МПа и температуре 175...183°C происходит взаимодействие известкового компонента с песчаным с образованием гидросиликатов кальция, которые обеспечивают высокую прочность изделию:



Сам процесс обработки материала в автоклаве при указанных условиях называется *гидротермальной обработкой* или проще – *автоклавной обработкой*. Ее продолжительность в зависимости от вида изделий, их состава и особенностей технологии составляет от 10 до 12 ч. Образовавшиеся в процессе автоклавной обработки гидросиликаты кальция обеспечивают изделию высокую прочность, плотность, морозостойкость и другие технико-эксплуатационные качества.

По структуре силикатные автоклавные материалы подразделяют на изделия плотной и пористой структуры. К первым относятся силикатный кирпич и камни, силикатный бетон, ко вторым –

автоклавные ячеистые бетоны, газосиликат. О поризованных силикатных изделиях было рассказано в п. 3.1.7, поэтому в данном разделе речь пойдет об изделиях плотной структуры.

3.4.1. Силикатный кирпич и камни

Силикатный кирпич – это материал, изготавливаемый на основе известково-песчаного вяжущего, песка естественной крупности и воды. Известково-песчаное вяжущее представляет собой измельченные совместно взятые в определенном отношении компоненты извести и песка. Полученное вяжущее затем смешивается (также в определенной пропорции) с неизмельченным песком. После смешивания этот продукт называется *силикатной смесью*. По составу в силикатной смеси присутствует 6...8 % извести (в пересчете на активную СаО), остальное – песок как измельченный, так и естественной крупности.

Далее силикатная смесь увлажняется с целью полного гашения извести и обеспечения необходимой формовочной влажности (в целом она составляет 9...11 %). Гашение известково-песчаной массы осуществляется в специальных гасильных барабанах или силосах. По окончании гашения масса направляется на формование, которое осуществляется на револьверных гидравлических прессах под давлением 20 МПа. Отформованные кирпичи-сырец укладываются автоматом-укладчиком на вагонетку и по рельсовому пути направляются в автоклав, где проходят в дальнейшем гидротермальную обработку [36].

Себестоимость силикатного кирпича примерно на 25...35 % ниже керамического, так как в 2 раза меньше расходуется топлива, в 3 раза – электроэнергии, ниже трудоемкость производства, значительно короче производственный цикл, поэтому силикатный кирпич экономически эффективнее, чем керамический.

Плотность обыкновенного силикатного кирпича несколько выше, чем полнотелого керамического и составляет 1800...1900 кг/м³. Снижение плотности кирпича и камней достигается формованием в них пустот или введением в сырьевую массу пористых заполнителей (например, керамзитового песка). Теплопроводность силикатного и керамического кирпича примерно одинакова и составляет 0,8...0,9 Вт/(м·К).

Силикатный кирпич в зависимости от размеров может быть:

– одинарный (полнотелый или с пористыми заполнителями) – 250×120×65 мм;

– модульный (пустотелый или с пористыми заполнителями) – $250 \times 120 \times 88$ мм. Масса модульного кирпича не должна превышать 4,3 кг;

– силикатный камень (только пустотелый) – $250 \times 120 \times 138$ мм.

По назначению силикатный кирпич бывает *рядовым* и *лицевым*. Цвет кирпича – от молочно-белого до светло-серого. Выпускают также лицевой кирпич с повышенными физико-механическими свойствами; он может быть цветным – окрашенным в массу или по лицевым граням щелочестойкими пигментами в голубой, красный, зеленый, желтый и другие цвета (рис. 64).



Рис. 64. Цветной пустотелый силикатный кирпич и камни

В зависимости от прочности силикатный кирпич и камни подразделяются на восемь марок, кгс/см²: М75, М100, М125, М150, М175, М200, М250, М300. Водопоглощение – не менее 6 %. Марки по морозостойкости: F15, F25, F35 и F50; для лицевых изделий морозостойкость должна быть не ниже 25 циклов.

Существенным недостатком силикатного кирпича по сравнению с керамическим являются пониженные водостойкость, солестойкость и жаростойкость.

Силикатный кирпич применяется для кладки наружных и внутренних стен надземных частей зданий и сооружений. Использовать его в конструкциях, подвергающихся воздействию воды

(фундаменты, цоколи, канализационные колодцы и т.п.) и высоких температур (печи, дымовые трубы и т.п.) запрещается.

Кроме известково-песчаного силикатного кирпича выпускают *известково-шлаковый* и *известково-зольный* кирпичи, в которых вместо песка частично или полностью используются промышленные отходы, содержащие активный кремнезем (SiO_2) – золы ТЭС и шлаки. Это позволяет существенно снизить себестоимость продукции и расширить ее сырьевую базу. Свойства этих видов кирпича аналогичны свойствам известково-песчаного.

3.4.2. Силикатные бетоны

Силикатные бетоны – это обширная группа бесцементных бетонов автоклавного твердения, получаемых на основе известково-песчаного, известково-зольного и других известково-кремнеземистых вяжущих и различных минеральных заполнителей. Основным цементирующим веществом таких бетонов являются гидросиликаты кальция различной основности.

Силикатные бетоны, как и цементные, могут быть тяжелыми (заполнитель – песок или щебень или песчано-гравийная смесь), легкими (заполнители пористые: керамзит, вспученный перлит, аглопорит и др.) и ячеистыми (заполнителем служат пузырьки воздуха, равномерно распределенные по сечению изделия).

По плотности различают плотный (тяжелый) силикатный бетон с плотностью 1800...2500 кг/м^3 , легкий плотностью 500...1800 кг/м^3 и особо легкий (ячеистый) плотностью менее 500 кг/м^3 .

Развитие производства крупноразмерных силикатных изделий, особенно изготавливаемых с полной заводской отделкой, способствует индустриализации строительства, дает возможность экономить цемент и позволяет расширить базу полносборного строительства. Наибольшее практическое распространение получили *тяжелые мелкозернистые* (без крупного заполнителя) бетоны с плотностью 1800...2500 кг/м^3 и марками по прочности – 150, 200, 250, 300, 400 и 500. Можно получать силикатный бетон и большей прочности при увеличении дисперсности и количества тонкомолотого кварцевого песка в смеси известково-кремнеземистого вяжущего, сильном уплотнении и соответствующем режиме автоклавной обработки [14].

Прочность силикатного бетона при сжатии, изгибе и растяжении, деформативные свойства, сцепление с арматурой обеспечивают одинаковую несущую способность конструкций из силикатного и цементного бетонов при одинаковых их размерах и степени армирования. Поэтому силикатный бетон можно использовать для

армированных и предварительно напряженных конструкций, что ставит его в один ряд с классическим цементным бетоном.

Морозостойкость силикатных бетонов несколько ниже, чем цементных, однако достаточно высока. При водопоглощении 10...18 % они имеют марки по морозостойкости от F35 до F100.

Недостаток мелкозернистых силикатных бетонов – повышенная их деформативность и, следовательно, более низкий (в 1,5...2,5 раза) модуль упругости по сравнению с цементным бетоном на крупном заполнителе, а также пониженная долговечность. Наиболее доступный способ повышения долговечности силикатных бетонов – увеличение их плотности за счет роста давления прессования или введения уплотняющих добавок. Возможна также обработка материала кремнийорганическими гидрофобизирующими жидкостями или пропитка солями кремнефтористоводородной кислоты.

Из плотных силикатных бетонов изготавливают все несущие конструкции для жилищного, промышленного и сельского строительства: панели и блоки внутренних стен (рис. 65), панели перекрытий, лестничные марши и площадки, балки, прогоны и колонны, карнизные плиты и другие армированные сборные детали. Тяжелые силикатные бетоны применяют для изготовления таких высокопрочных изделий, как прессованный безасбестовый шифер, напряженно армированные силикатобетонные железнодорожные шпалы, армированные силикатобетонные тубинги для отделки туннелей метро и для шахтного строительства.

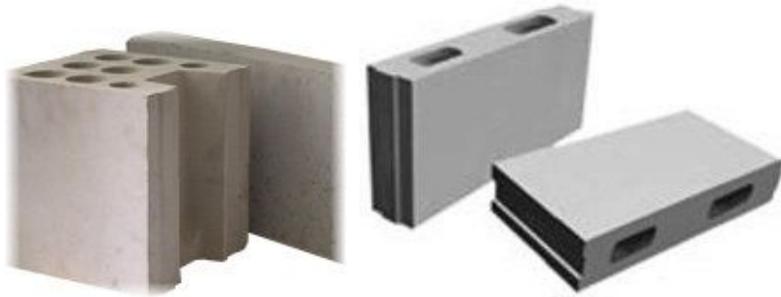


Рис. 65. Пазогребневый силикатный блок (слева) и пустотелая силикатобетонная панель (справа)

Силикатный бетон находит применение для строительства сборных покрытий и оснований дорог общего пользования. Он имеет высокую сопротивляемость износу и высокий коэффициент сцепления с колесом автомобиля.

Силикатный бетон можно армировать как обычной, так и предварительно напряженной арматурой. Коррозия арматуры в силикатном бетоне зависит от плотности бетона и условий службы конструкций. При нормальном режиме эксплуатации арматура в плотном силикатном бетоне (плотности не менее 1900 кг/м^3) не корродирует. При влажных и переменных режимах эксплуатации в конструкциях из плотного силикатного бетона арматуру необходимо защищать антикоррозионными обмазками.

Кроме несущих конструкций из силикатных бетонов (с добавкой цемента) изготавливают облицовочные изделия, в частности силикатные облицовочные плиты. Их применяют для облицовки кирпичных жилых и промышленных зданий, за исключением цоколей, наружных подоконников, поясков и других частей зданий, подвергающихся значительному увлажнению. Возможность окраски силикатных плит в различные цвета с помощью щелочестойких пигментов позволяет повысить их декоративные качества и широко использовать для архитектурной отделки фасадов зданий.

Легкие силикатные бетоны – это бетоны на пористых заполнителях. Вяжущие используются те же, что и для плотных силикатных бетонов, а пористыми заполнителями служат керамзит, вспученный перлит, аглопорит, шлаковая пемза и другие пористые материалы в виде гравия и щебня.

Прочность при сжатии легких силикатных бетонов составляет от 3,5 до 20,0 МПа, водопоглощение по объему – от 12 до 30 %, морозостойкость – 15...50 циклов.

По назначению различают теплоизоляционные, конструкционно-теплоизоляционные и конструкционные легкие силикатные бетоны.

Теплоизоляционные (плотностью менее 500 кг/м^3 и теплопроводностью $0,187 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) применяются для теплоизоляции ограждающих конструкций (покрытий промышленных цехов, чердачных перекрытий и т.д.).

Конструкционно-теплоизоляционные применяются для наружных ограждающих конструкций (наружных стен зданий, совмещенных кровель и т.д.). Плотность таких бетонов колеблется от 500 до 1400 кг/м^3 , теплопроводность – $0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и марка по прочности – не менее М35.

Конструкционные легкие силикатные бетоны с плотностью от 1400 до 1800 кг/м^3 имеют марку по прочности не ниже М50. Эти бетоны обычно применяют в армированных силикатобетонных конструкциях, к которым требования по теплопроводности не предъявляются.

Не уступая железобетонным по строительно-эксплуатационным свойствам, силикатобетонные конструкции имеют существенные экономические преимущества: меньшую стоимость сырья, меньший расход вяжущего, низкую заводскую себестоимость (на 20...30 % ниже аналогичных железобетонных).

Как разновидность силикатных бетонов могут рассматриваться бетоны на известково-шлаковом и известково-зольном вяжущих, в которых кремнеземистый компонент представлен отходами металлургической, энергетической и химической промышленности – золами и шлаками. На их основе могут быть получены тяжелые, легкие и ячеистые бетоны, прочностные и другие свойства которых меняются в широких пределах в зависимости от свойства вяжущего и условий гидротермальной обработки. При автоклавном твердении на таких вяжущих можно получать бетоны с прочностью 30...40 МПа и морозостойкостью не менее 50 циклов. Эти бетоны стойки к воздействию сульфатных вод, что объясняется отсутствием в затвердевшем цементном камне свободной $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [31, 32].

4. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В последние годы ежегодный рост производства основных видов строительных материалов составляет от 7 до 30 %. Больше стало производиться отечественной продукции, удовлетворяющей современным требованиям и соответствующей по качеству мировым аналогам.

По прогнозам специалистов в ближайшие десятилетия в большей степени получит развитие производство следующих материалов:

- изделия из бетона и железобетона;
- стеновые материалы (кирпич и камни, блоки и панели);
- отделочные материалы;
- теплоизоляционные материалы;
- изделия на основе гипса;
- сухие смеси различного назначения.

Изделия из бетона и железобетона. Без бетона и железобетона, пожалуй, трудно было бы себе представить современную архитектуру. Массовые жилые и общественные здания, мосты, плотины гидростанций, телебашни, огромные промышленные комплексы – все это в большинстве случаев железобетонные сооружения.

Железобетон – основной конструкционный материал современности. С его применением возведены самые высокие в мире телебашни, небоскребы, крупнейшие мосты, дороги, электростанции, тоннели, аэропорты. Из железобетона построены сотни миллионов квадратных метров жилых зданий, соборы, театры, больницы и многое другое.

Формообразующие возможности железобетона хорошо проявляются при строительстве монолитных сооружений. Их пластическая выразительность не вызывает сомнений. Яркие примеры использования монолитного железобетона – Останкинская телебашня, здание МГУ, различные спортивные сооружения в городах РФ, монумент «Родина-мать» в Волгограде (рис. 66).

Роль бетона и железобетона в архитектуре определяется, прежде всего, тем, что они послужили основой для создания ряда новых конструктивных систем и архитектурных форм, которых прежде не было. Это – железобетонный каркас с безбалочными перекрытиями, здания из панелей и объемных блоков, покрытия больших пролетов, которых еще не знала ни одна историческая эпоха.



Рис. 66. Башня Останкинского телецентра (слева). 1963–1967 гг., архитекторы Л. И Баталов, Д. И Бурдин и монумент «Родина-мать» в Волгограде (справа). 1959–1967 гг., скульптор Е. В. Вучетич

Различные конструктивные системы из железобетона используются для строительства сборно-монолитных зданий. Оригинальные сборно-монолитные здания высотой более 50 этажей построены в Сиднее и Монреале, 110-этажный небоскреб «Уиллис тауэр» высотой 443 м в

Чикаго, знаменитая «Дубайская башня» в Объединенных Арабских Эмиратах, являющаяся на сегодняшний день самым высоким зданием в мире (его высота 828 м, количество этажей – 162). Эту башню называют еще «цветком из бетона» (рис. 67).



Рис. 67. Дубайская башня (Бурдж-Дубай) в ОАЭ (слева). 2004–2010 гг., архитектор Э. Смит и небоскреб Уиллис-тауэр в Чикаго (справа). 1970–1973 гг., архитектор Б. Грэм

Разнообразные пространственные покрытия из железобетона – оболочки (призматические, цилиндрические, торцовые, купола, гиперболоиды) и висячие покрытия – позволяют архитектору создавать сооружения, практически не имеющие ограничений по форме. Среди характерных примеров складчатое покрытие конференц-зала ЮНЕСКО в Париже, покрытия в виде ребристого купола рынка в Лейпциге, волнистого купола рынка в Руане (Франция) и гладкого купола с опорной чашей цирка в Казани. Формообразующие возможности железобетона используются архитекторами при создании оригинального пластического решения фасадов и интерьеров зданий [37].

В XXI в. бетон получит развитие как один из основных материалов для строительства и архитектуры. Уже сегодня применяется более тысячи видов различных бетонов от особо легких с плотностью 100 кг/м³ до особо прочных с прочностью более 100 МПа и большое разнообразие специальных бетонов с разными комплексами свойств [38].

Сравнительная простота и доступность бетонных технологий, широкая возможность использования местного сырья и вторичных отходов промышленности, низкая энергопотребность производства, доступная стоимость и широкая возможность в воплощении самых

различных архитектурно-строительных решений – все это является гарантией широкого применения бетона в строительстве.

Сегодня мы имеем широкую гамму различных видов бетона. Здесь и обычный тяжелый бетон, и легкие ячеистые бетоны, и мелкозернистые бетоны, фибробетоны, и специальные бетоны, в том числе с использованием полимерных материалов и самых различных вяжущих веществ. Многообразие видов бетона обуславливает его успешное применение в условиях рыночной экономики и технического прогресса.

В современных условиях бетоны становятся многокомпонентными, при их приготовлении широко используются химические модификаторы структуры и свойств, активные минеральные ультрадисперсные компоненты и ряд других эффективных добавок.

В современном строительстве наряду с традиционными обычными тяжелыми бетонами для различных видов конструкций получают применение новые эффективные виды бетонов: высокопрочные; бетоны повышенной долговечности; безусадочные; расширяющиеся и напрягающие; специальные бетоны, в том числе на новых композиционных вяжущих; новые виды легких бетонов и ряд других. Новое слово в технологии железобетона – применение *самоуплотняющихся* бетонных смесей. Применение таких смесей, уплотняющихся под действием собственных сил тяжести, позволяет отказаться от вибрации или прессования, позволяет получать изделия требуемой прочности и долговечности.

Достижения строительного материаловедения позволили объединить в единый комплекс положительные свойства различных групп бетонов. Так появился новый класс бетонов – *высококачественные* бетоны. Это многокомпонентные бетоны, в которых используются композиционные вяжущие вещества, химические модификаторы структуры, свойств и технологии, активные минеральные компоненты и расширяющиеся добавки. Многокомпонентность системы позволяет управлять структурообразованием на всех этапах технологии.

На основе новых видов вяжущих и модификаторов получают распространение *особобыстротвердеющие* бетоны с прочностью через 3...4 ч 40...50 МПа и более, что обеспечивает значительную экономию энергоресурсов в строительстве; бетоны, твердеющие при отрицательных температурах (до – 30°C); бетоны со специальными свойствами: защитные, электротехнические, антибактерицидные, жаростойкие и др. Растет производство и применение *пи-бетонов*, в которых сочетание минеральной и органической структур открывает

возможности получения материалов с самыми различными свойствами и назначением.

С целью ресурсосбережения и улучшения теплотехнических свойств материала получают большое развитие *воздухонаполненные* бетоны. При этом будет увеличиваться степень воздухонаполнения и повышаться качество материала. Ячеистые бетоны различных способов получения, легкие бетоны на пористых заполнителях, в том числе безобжиговых и полимерных дадут возможность использовать более совершенные технологии изготовления, большее разнообразие и многокомпонентность состава и сырья.

Получат распространение различные виды *архитектурного* и *декоративного* бетона: цветные бетоны; бетоны с различной структурой поверхности; бетоны-искусственные камни, не только повторяющие вид ценных отделочных природных камней, но и позволяющие получать новые разновидности отделочных материалов, не уступающих по свойствам природным каменным; бетоны с поверхностной декоративной и защитной отделкой. Для получения декоративных и долговечных бетонных изделий используются специальные составы, наложенные на поверхность, плазменное напыление и другие способы.

Совершенно необычное визуальное восприятие изделия или архитектурного ансамбля может быть получено при применении нового композиционного материала – так называемого *светящегося* бетона, в состав которого вводятся стеклянные оптические волокна, уложенные определенным образом в теле бетонной панели. При определенном соотношении компонентов и характеристик стекловолокна возникает поразительный эффект «свечения» поверхности конструкций различными цветами, оттенками и узорами (рис. 68).

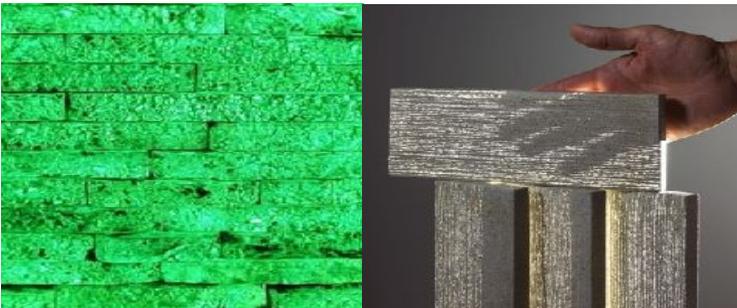


Рис. 68. Новый композиционный материал – светящийся бетон

Получат распространение тонкомолотые цементы и бетоны на их основе, бетоны с фиксированной первоначальной структурой и уменьшенной усадкой, различные виды пропитанных бетонов, фибробетоны. В последние годы все шире применяются *мелкозернистые* бетоны. Большая однородность их структуры и широкая возможность ее модификации позволяет получать мелкозернистые бетоны самых различных свойств и назначения. Природные крупные заполнители часто обладают недостаточной прочностью для получения высокопрочных бетонов. Переход к мелкозернистым бетонам обеспечивает получение бетонов с тонкозернистой структурой, которая обладает высокой прочностью и стойкостью к воздействиям различных факторов. В этих бетонах, как правило, обязательно применение эффективных комплексных добавок, позволяющих уменьшить водопотребность бетонной смеси и усадку бетона. Технология мелкозернистых бетонов позволяет получать бетоны с переменной плотностью от 100 до 2000 кг/м³ и прочностью от 0,2 до 150 МПа и более [39, 40]. Мелкозернистые бетоны весьма технологичны, обладают высокой однородностью и долговечностью.

Новые виды бетона позволяют придать современным городам и сооружениям особую выразительность, значительно расширить возможности новых архитектурных решений. Появление новых видов бетона открыло эру следующего поколения зданий и сооружений: небоскребов с каркасом из монолитного бетона, большепролетных мостов, железобетонных платформ для добычи нефти и газа на океанических шельфах, подземных мини-городов, архитектурного железобетона и многих других сооружений, отвечающих требованиям XXI в.

Значение бетона и железобетона, как основных строительных материалов XXI в. трудно переоценить. Велика их роль для архитектуры. Массовость, значимость, экономичность этих материалов, изделий и конструкций из них позволяет реализовать стремление прогрессивных архитекторов создать массовое производство жилых домов и вплотную подойти к решению жилищной проблемы. Внедрение бетона и железобетона в строительство внесло коренные изменения не только в традиционные методы проектирования, но и в само содержание архитектурного творчества.

Архитектурное освоение железобетона только начинается. В архитектуре ближайшего будущего бетон и железобетон сохраняют свое лидирующее место при разумном сочетании с другими старыми и

новыми материалами. Задача архитектора – сделать это лидерство не только технически оправданным, но и эстетически осмысленным.

Ячеистый бетон в современном строительстве. Реализация национального проекта «Доступное и комфортное жилье – гражданам России» потребует изготовления огромного количества ограждающих конструкций, в том числе для стен и крыш жилых зданий. Среди наиболее эффективных для этих целей материалов отечественные и зарубежные специалисты выделяют ячеистые бетоны, относящиеся к группе легких бетонов и отличающиеся рядом уникальных свойств, в том числе замечательной звуко- и теплоизоляцией, а также пожаростойкостью.

Последнее обстоятельство привлекает особое внимание европейских строителей. В принятой европейским союзом директиве по строительным изделиям пожаростойкость является одним из важнейших критериев при оценке пригодности зданий и сооружений к эксплуатации. Результатами многочисленных исследований установлено, что конструкции из ячеистого бетона не горят и не поддерживают горение, не содержат горючих компонентов, при горении не выделяют токсичных веществ, обладают высокими теплоизолирующими качествами, в том числе в условиях пожара, сохраняя в течение длительного времени целостность и несущую способность. Имеется опыт успешного использования ячеистого бетона и в конструкциях противопожарных преград и стен (брандмауэров).

Опыт многолетнего применения зданий из ячеистого бетона в сейсмоопасных районах, например в Мексике, подтверждает его эффективность как в малоэтажном, так и в высотном строительстве. Существенное снижение массы зданий и некоторые другие характеристики материала делают его применение достаточно привлекательным также и в сейсмоопасных регионах.

Нельзя не отметить также прекрасную обрабатываемость изделий из ячеистого бетона, причем все это легко выполняется прямо на стройплощадке. Ячеистый бетон поддается пилению и сверлению так же, как и изделия из древесины. Для жильцов таких зданий определенным интересом представляет легкая возможность устройства анкерных креплений в стенах для различных хозяйственных нужд.

Изделия из ячеистого бетона по своим техническим характеристикам не только не уступают, но и по ряду показателей (низкая плотность и теплопроводность, высокая морозостойкость) превосходят строительно-технические характеристики традиционных стеновых материалов – керамический и силикатный кирпич,

железобетон и др. Замена изделий из традиционных материалов изделиями из ячеистого бетона в наружных стенах зданий снижает их массу на 25...60 %, а массу зданий в целом – на 20...30 %. Соответственно снижаются трудозатраты на строительство и одновременно улучшаются теплотехнические свойства конструкций, что позволяет уменьшить затраты теплоэнергии на обогрев зданий.

Важным свойством стен из ячеистого бетона, характеризующим его как экологичный материал, является высокая паропроницаемость. Это свойство позволяет «дышать» стенам, обеспечивая свободный проход через них пара и газов. Термоаккумулирующие свойства ячеистого бетона и древесины примерно одинаковы.

По долговечности здания, наружные стены которых выполнены с применением ячеистобетонных панелей или блоков, не уступают зданиям со стенами, выполненными из кирпича или бетона (прогнозируемая долговечность стен из автоклавного газобетона – 125 лет).

Экономическая эффективность применения ячеистого бетона при строительстве несущих стен жилых зданий по сравнению с другими строительными материалами (пустотелый кирпич, керамзитобетонные, пенобетонные, полистиролбетонные блоки, деревянный брус) характеризуется следующими показателями: 1 м² стены с сопротивлением теплопередаче $R = 1,96$ (м²·К)/Вт из газобетонных блоков плотностью D 500 дешевле в 2,4 раза стены кирпичной; в 2,1 раза – керамзитобетонной; в 1,8 раза – деревянной; в 1,4 раза пенобетонной [41].

Силикатные автоклавные материалы и изделия широко применяются в современном строительстве. Они занимают третье место среди стеновых конструктивных материалов, по объему производства уступая лишь керамическому кирпичу и сборному железобетону. Ведущее место в группе силикатных автоклавных материалов занимает силикатный кирпич и стеновые изделия из ячеистого бетона. Быстрое развитие производства автоклавных материалов объясняется широкой распространенностью сырья, сравнительной простотой технологии, высоким качеством и низкой себестоимостью изделий. В настоящее время они все более широко используются в гражданском, промышленном, транспортном и других отраслях строительства.

Несмотря на серьезных конкурентов (панели, ячеистобетонные блоки и др.) силикатный кирпич остается по-прежнему одним из основных стеновых материалов в жилищном строительстве. В настоящее время происходит интенсивное строительство 2...

3-этажных коттеджей из кирпича, а также многоэтажных зданий, наружные стены которых возводят трехслойными из железобетона, теплоизоляционного слоя и наружной кирпичной облицовки.

Быстрое развитие производства силикатного кирпича во многих странах было обусловлено, в первую очередь, его высокой экономичностью и качеством. Наша страна одной из первых в мире приступила к организации производства этого вида продукции.

Еще 50 лет назад советские ученые отметили, что силикатный кирпич по затратам труда, топлива, электроэнергии и по размерам капиталовложений примерно в 2 раза экономичнее керамического кирпича. Если сравнить технико-экономические показатели керамического и силикатного кирпича, то у последнего они значительно выше. На производство силикатного кирпича затрачивается 15...18 ч, в то время как на производство керамического – 5...6 дней и более, а себестоимость ниже на 20...40 %. Однако у силикатного кирпича меньше жаростойкость, химическая стойкость, морозо- и водостойкость, несколько выше плотность и теплопроводность, со временем изменяется цвет силикатного кирпича, который становится серым. Ввиду этих причин у строителей и архитекторов силикатный кирпич менее популярен, чем керамический. Но современная технология позволяет не только избавиться от указанных недостатков, но также существенно расширить цветовую гамму силикатного кирпича.

Широкое применение в двух- и трехслойных наружных стенах теплоизоляционных материалов (ячеистый бетон, минеральная вата и т.п.) позволяет снизить требования к кирпичу по теплотехническим показателям. Применение силикатного кирпича в таких стенах повышает тепловую инерцию стен и комфортность жилых помещений [42].

В силу этого силикатный кирпич и камни остаются в числе основных стеновых материалов, необходимых для решения задач по расширению строительства жилищного фонда в стране. По оценкам экспертов ожидается двукратное увеличение потребности в силикатном кирпиче и альтернативы ему нет.

Стоит также упомянуть и о другой разновидности силикатных автоклавных материалов – силикатном бетоне. Из него могут быть изготовлены многие сборные изделия, применяемые в жилищном, гражданском, промышленном и сельском строительстве, в том числе и специализированные изделия сложных форм. Наиболее эффективны пустотные изделия, так как при этом улучшаются условия прогрева и охлаждения изделий, снижается их масса и расход материалов на

изготовление. Следует также отметить, что силикатобетонные изделия, как правило, на 15...25 % дешевле цементно-бетонных.

Изделия из строительного гипса. Несмотря на то, что гипс известен в качестве строительного и отделочного материала уже несколько тысяч лет, его использование только сейчас выходит на соответствующий уровень. Долгие годы гипс заменялся цементом только потому, что изделия из гипса боятся влаги. В настоящее время изобретен влагостойкий гипс, вернее изделия из него: стеновые панели, панели для потолка, воздуховоды, различные перегородки.

Рынок строительных и отделочных материалов постоянно пополняется новинками, среди которых есть и изделия из гипса. Так, например, всего несколько десятилетий назад повсюду применялся гипсокартон. Но с изобретением стекловолокна появились армированные стеновые панели из гипса. Это придает им дополнительную прочность и жесткость.

То, что у гипса большое будущее говорит тот факт, что запасы этого природного минерала огромны. Даже если наращивать его добычу, то современных месторождений хватит на сотни лет. Кроме того, производство гипса гораздо дешевле с экономической точки зрения. Преемник гипса – цемент в процессе своего производства очень сильно загрязняет экологию, кроме того, для обжига цементного клинкера требуется огромное количество энергии.

Изделия из гипса более долговечны, чем пластиковые, виниловые и даже металлические. Современная штукатурка с использованием гипса практически не подвержена воздействию атмосферных осадков.

Строительная промышленность осваивает производство новых видов строительных и отделочных материалов, например, гипсовых пазогребневых блоков, которые со временем придут на замену традиционным шлакоблокам.

Благодаря таким своим свойствам, как высокая экологичность, легкость, негорючесть, низкая себестоимость, простота монтажа и обработки, гипс завоевывает все новые рынки и области применения. Долговечность и надежность этого материала доказана временем: единственно сохранившееся до наших времен чудо света – египетские пирамиды изнутри оштукатурены гипсом. На гипсовой штукатурке прекрасно сохранились древние иероглифы и письма. Среди современных эффективных строительных материалов строительный гипс занимает одно из ведущих мест.

Создание гипсо-цементно-пуццоланового вяжущего позволило значительно расширить области применения гипсовых материалов в

строительстве за счет их использования в наружных конструкциях и в зданиях с повышенной относительной влажностью воздуха.

Дальнейшие исследования по повышению эффективности гипсовых вяжущих позволили получить водостойкие вяжущие нового поколения: *гидравлические композиционные гипсовые вяжущие* (КГВ) и бетоны на их основе. Эти вяжущие, сохранив положительные свойства гипсовых (быстрота твердения и отличные формовочные свойства), обладают гидравлическими свойствами. Это открывает новые возможности для стройиндустрии по производству и применению эффективных материалов и изделий [43, 44].

Отделочные и декоративные материалы. За последние 10...15 лет в России значительно расширилась номенклатура новых отделочных и декоративных материалов, применение которых способствует индустриализации строительства зданий, уменьшению трудоемкости работ и снижению их стоимости при одновременном улучшении технологических, эксплуатационных и художественных качеств интерьера. Каждое помещение здания должно иметь элементы изобразительного или декоративного искусства, которые обогатили бы архитектуру и усиливали художественную выразительность интерьера.

Одним из популярных современных отделочных материалов является *декоративный искусственный камень* – облицовочный материал, имитирующий фактуру горных пород (рис. 69). Популярность этого материала объясняется его долговечностью, огне- и водостойкостью, простотой укладки, относительно невысокой стоимостью и высокими декоративными качествами. Искусственный камень изготавливается из белого портландцемента, различных наполнителей, экологически чистых минеральных красителей и специальных добавок, обеспечивающих высокую прочность и морозостойкость.



Рис. 69. Образцы кладки из искусственного декоративного камня

Архитекторы и дизайнеры высоко оценили возможность использования декоративного камня в малоэтажном загородном строительстве [45]. Он превосходно сочетается с деревянными окрашенными или оштукатуренными стенами, коваными оградами, металлическими элементами лестниц и балконов. Весьма привлекательно выглядят сочетания более рельефных фактур на цоколе и более гладких на верхней части фасадов, либо сочетания различных оттенков одной фактуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение дисциплины «Архитектурное материаловедение» в школе архитекторов и дизайнеров, несомненно, подняло уровень знаний студентов, обучающихся по этим специальностям, а в конечном итоге – их творческое мастерство. Конечно, это потребовало (и потребует в дальнейшем) не одного года упорнейшей кропотливой работы людей разных специальностей и взглядов. Труднее всего будет подготовить хорошие фундаментальные учебники и пособия по новому комплексному курсу. Но здесь не надо будет начинать с нуля – в нашем распоряжении уже сегодня имеются прекрасные труды российских и зарубежных архитекторов и инженеров, содержащие базовую основу для изучения данной дисциплины. Авторы надеются, что полезным и весомым будет и этот учебник.

Профессионализм архитектора зависит от его владения методами проектирования и проведения технико-экономических расчетов; знаний технических, художественных, экологических и других требований для проектируемых объектов; знаний специфики условий реализации проектов, а также передового отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства. Квалифицированный специалист должен отлично разбираться в видах и свойствах строительных материалов и конструкций, требованиях охраны окружающей среды, стандартах и технических условия к разработке и оформлению проектно-сметной документации; технологиях строительства и эксплуатации объектов. Ведь город будущего еще не построен. И строить его предстоит вам – архитекторам будущего.

И еще об одном хотелось сказать в этой книге. Трудно представить себе будущее архитектуры, также нелегко заглянуть в далекое будущее ее материальной базы. Но попытаться увидеть завтрашний

день и активно прогнозировать развитие этой базы сегодня – это тоже творческая задача архитектора и дизайнера.

СЛОВАРЬ ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ

Адгезия (от лат. adhaesio – прилипание, сцепление) – слипание (сцепление) поверхностей двух разнородных твердых или жидких тел, находящихся в тесном соприкосновении (контакте).

Коагуляция (от лат. coa-gulato – свертывание, сгущение) – укрупнение частиц в дисперсных системах; ведет к выпадению из коллоидного раствора хлопьевидного осадка или к загустеванию.

Композит – 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.

Микрокремнезем – (микросилика, silica fume) — представляет собой ультрадисперсный материал, состоящий из частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки печей при производстве кремнийсодержащих сплавов. Основным компонентом материала является диоксид кремния аморфной модификации. Микросилика является важнейшим компонентом при производстве бетонов с высокими эксплуатационными свойствами.

Пептизация – самопроизвольный распад агрегатов (комочков, хлопьев, сгустков), образованных скоплением слипшихся коллоидных частиц, на агрегаты меньших размеров или отдельные первичные частицы.

Портландит – фаза $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующаяся в цементном камне при гидролизе минералов портландцементного клинкера.

Реология (от греч. rheos – течение, поток) – наука о деформациях и текучести веществ. Рассматривает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением разнообразных вязких и пластичных материалов, явления релаксации напряжений и т.д.

Суспензия (от позднелат. suspensio, буквально – подвешивание, от лат. suspendo – подвешиваю), взвесь – дисперсная система, состоящая из взвешенных в жидкости мелких твердых частиц (напр., мутная глинистая вода). Микрогетерогенная система с твердой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой.

Фаза – совокупность гомогенных частей системы одинаковых по свойствам и по физическому строению, или вся система, если она однородна.

Эмульсия – дисперсная система, состоящая из двух нерастворяющихся друг в друге жидкостей, одна из которых (*дисперсная фаза*) распределена в другой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Попов, К.Н.* Строительные материалы и изделия: учебник для вузов / К.Н. Попов, М.Б. Каддо. – М.: Высшая школа, 2005. – 438 с.
2. *Шмитько, Е.И.* Химия цемента и вяжущих веществ / Е.И. Шмитько, А.В. Крылова, В.В. Шаталова. – СПб: Изд-во «Перспектив науки», 2006. – 206 с.
3. *Бутт, Ю.М.* Химическая технология вяжущих материалов: учебник для вузов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
4. *Значко-Яворский, И.Л.* Очерки истории вяжущих веществ / И.Л. Значко-Яворский. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 496 с.
5. *Кочетов, В.А.* Римский бетон / В.А. Кочетов. – М.: Стройиздат, 1991. – 111 с.
6. *Пащенко, А.А.* Вяжущие материалы / А.А. Пащенко, В.П. Сербин, Е.А. Старчевская – Киев: Вища школа, 1985. – 440 с.
7. *Сулименко, Л.М.* Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе: учебник для вузов / Л.М. Сулименко. – М.: Высшая школа, 2005. – 334 с.
8. *Байер, В.Е.* Архитектурное материаловедение / В.Е. Байер. – М.: Архитектура С, 2006. – 264 с.
9. *Байер, В.Е.* Материаловедение для архитекторов, реставраторов, дизайнеров: учеб. пособие / В.Е. Байер. – М.: Астрель, 2004. – 250 с.
10. *Лесовик, В.С.* Гипсовые вяжущие материалы и изделия: учеб. пособие / В.С. Лесовик, С.А. Погорелов, В.В. Строкова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. – 224 с.
11. *Волженский, А.В.* Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
12. *Лугинина, И.Г.* Химия и химическая технология неорганических вяжущих материалов: учеб. пособие для студ. вузов / И.Г. Лугинина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2004. – 240 с.
13. *Зубехин, А.П.* Белый портландцемент / А.П. Зубехин, С.П. Голованова, П.В. Кирсанов. – Ростов н/Д. Ред. Журн. «Известия вузов. Сев. Кавказский регион, 2004. – 264 с.
14. Строительные материалы: учеб. пособие / под ред. В.Г. Микульского. – М.: АСВ, 2004. – 536 с.

15. *Юдович, Ю. Э.* Цементы низкой водопотребности – вяжущие нового поколения / Б. Э. Юдович [и др.] // Цемент и его применение. – 2000. – № 1 – С. 15–18.

16. Вяжущие вещества, бетоны и изделия из них: учебное пособие для вузов / под ред. Г.И. Горчакова. – М.: Высшая школа, 1976. – 294 с.

17. *Баженов, Ю.М.* Новый век: новые эффективные бетоны и технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы I Всероссийской конференции. – М.: Стройиздат, 2001. – С. 91–101.

18. *Каприелов, С.С.* Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков // Бетон и железобетон. – 1996. – № 6. – С. 6–10.

19. *Дворкин, Л.И.* Основы бетоноведения / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – СПб.: Стройбетон, 2006. – 692 с.

20. *Ушеров-Маршак, А.В.* Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А.В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8–11.

21. *Касторных, Л.И.* Добавки в бетоны и строительные растворы / Л. И. Касторных: учебно-справочное пособие – Ростов н/Д.: Феникс, 2005. – 221 с.

22. *Батраков, В.Г.* Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы / В.Г. Батраков // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 4–7.

23. *Несветаев, Г.В.* Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах / Г. В. Несветаев // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 23–25.

24. *Прохоров, С.Б.* Опыт и особенности применения алюминиевых паст марок «Газобетоплайт», «Газобетолоукс» и «Газобетопласт» / С.Б. Прохоров, М.А. Короткий // Строительные материалы. – 2001. – № 1. – С. 20–22.

25. *Баженов, Ю.М.* Технология бетона: учебник для вузов / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.

26. *Гридчин, А.М.* Новые технологии высокопоризованных бетонов / А.М. Гридчин, [и др.] // Поробетон – 2005: сб. докл. Международной науч.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. – С. 6–16.

27. *Перцев, В.Т.* Особенности рецептуры поризованных бетонов / В.Т. Перцев, Г.И. Черноусенко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2009. – № 4. – С. 74–75.

28. *Гудков, Ю. В.* Стеновые материалы на основе ячеистых бетонов / Ю. В. Гудков, А. А. Ахундов // Строительные материалы. – 2004. – № 1. – С. 9–10.

29. *Баженов, Ю.М.* Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И.Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.

30. *Белов, В.В.* Краткий курс материаловедения и технологии конструкционных материалов для строительства: учеб. пособие / В.В. Белов, В.Б. Петропавловская. – М.: АСВ, 2006. – 208 с.

31. *Рыбьев, И.А.* Строительное материаловедение: учебное пособие для строит. специальностей вузов / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.

32. *Рыбьев, И.А.* Материаловедение в строительстве / И.А. Рыбьев. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 528 с.

33. *Козлов, В.В.* Сухие строительные смеси: учеб. пособие / В.В. Козлов. – М.: АСВ, 2000. – 96 с.

34. *Берней, И.И.* Технология асбестоцементных изделий: учебник для вузов / И.И. Берней, В.М. Колбасов. – М.: Стройиздат, 1985. – 400 с.

35. *Тимашев, В.В.* Технология асбестоцементных изделий: учебник для техникумов / В.В. Тимашев, Ю.С. Гризак. – М.: Стройиздат, 1979. – 333 с.

36. *Хавкин, Л.М.* Технология силикатного кирпича / Л.М. Хавкин. – М.: Стройиздат, 1982. – 384 с.

37. *Ясевич, В.Е.* Бетон и железобетон в архитектуре / В.Е. Ясевич. – М.: Стройиздат, 1980. – 188 с.

38. *Баженов, Ю.М.* Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.

39. *Трамбовецкий, В.П.* Долговечность железобетонных зданий и сооружений / В.П. Трамбовецкий // Технологии бетонов. – 2007. – № 4. – С. 52–54.

40. *Трамбовецкий, В.П.* Пути развития промышленности сборного железобетона / В.П. Трамбовецкий // Технологии бетонов. – 2007. – № 5. – С. 62–64.

41. *Вылегжанин, В.П.* Автоклавный газобетон для строительства экономичного и экологичного жилья / В.П. Вылегжанин, В.А. Пинскер // Строительные материалы. – 2009. – № 8. – С. 9–11.

42. *Хвостенков, С.И.* Развитие производства силикатного кирпича в России / С.И. Хвостенков // Строительные материалы. – 2007. – № 10. – С. 4–8.

43. *Коровяков, В.Ф.* Повышение водостойкости гипсовых вяжущих веществ и расширение области их применения / В.Ф. Коровяков //

Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 3. – С. 28–31.

44. *Ферронская, А.В.* Производство и применение гипсовых материалов и изделий. Терминологический словарь / А.В. Ферронская. – М.: АСВ, 2006. – 263 с.

45. *Попов, Л.Н.* Новые отделочные и декоративные материалы в строительстве XXI века / Л.Н. Попов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – № 2. – С. 36–37.