

В. Г. ЕВСТИФЕЕВ

# **ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

**УЧЕБНИК**

**В двух частях**

## **Часть 1. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

*Для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению «Строительство»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2011

УДК 624.012.35(075.8)

ББК 38.53я73

E263

Рецензенты:

зав. кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции» СПбГ АСУ,  
заслуженный деятель науки и техники РФ,  
проф., д-р техн. наук *Г. Н. Шоринев*;  
зав. кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции» МГСУ, проф.,  
канд. техн. наук *Н. Г. Головин*

**Евстифеев В. Г.**

E263 Железобетонные и каменные конструкции. В 2 ч. Ч. 1.  
Железобетонные конструкции : учебник для студ. учрежде-  
ний высш. проф. образования / В. Г. Евстифеев. — М. : Из-  
дательский центр «Академия», 2011. — 432 с.

ISBN 978-5-7695-6406-2

Рассмотрены физико-механические свойства бетона, стальной арма-  
туры и железобетона, а также экспериментальные основы теории сопро-  
тивления железобетона. Изложены вопросы расчета и конструирования  
обычных и предварительно-напряженных железобетонных конструкций  
по действующим нормативным документам. Приведены алгоритмы рас-  
четов и числовые примеры.

Для студентов учреждений высшего профессионального образова-  
ния.

УДК 624.012.35(075.8)

ББК 38.53я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Евстифеев В. Г., 2011

ISBN 978-5-7695-6406-2 (Ч. 1)

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-6407-9

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник написан автором на основе многолетнего опыта преподавания в Петербургском государственном университете путей сообщения и в других вузах. Учитывая сложность дисциплины, автор дал отдельное изложение вопросов проектирования конструкций из обычного и предварительно-напряженного железобетона, выделив последние в главу «Особенности расчета и конструирования предварительно-напряженных железобетонных элементов».

В части 1 описаны прочностные и деформативные свойства бетона, стальной арматуры и железобетона, а также экспериментальные основы теории сопротивления железобетона; рассмотрены вопросы расчета и конструирования обычных и предварительно-напряженных железобетонных конструкций по действующим нормативным документам СНиП 52-01-2003, СП 52-101-2003 и СП 52-102-2004, приведены алгоритмы расчета и числовые примеры. В приложениях даны необходимые при проектировании материалы.

В части 2 рассмотрены виды материалов, применяемых для выполнения каменных и армокаменных конструкций, и каменных кладок; физико-механические свойства каменных кладок; основные положения расчета и конструирования каменных и армокаменных конструкций по предельным состояниям первой и второй групп в соответствии с действующими нормативными документами; конструктивные схемы каменных зданий, проектирование каменных стен зданий и частей зданий из каменной кладки; особенности проектирования конструкций, возводимых в зимнее время; приведены числовые примеры расчетов; в таблицах даны необходимые для проектирования материалы.

Размерности физических величин даны в Международной системе единиц (СИ) и приняты стандартизированные условные обозначения нагрузок, физико-механических величин, характеристик материалов и геометрических характеристик сечений железобетонных элементов каменных и армокаменных конструкций.

# ВВЕДЕНИЕ

**Сущность железобетона.** *Железобетоном* называется комплексный строительный материал, состоящий из бетона и стали, которые в железобетонных конструкциях работают совместно вплоть до разрушения. Такое сочетание материалов целесообразно, так как стальные стержни, поставленные в растянутой зоне элемента, прекрасно восполняют основной недостаток бетона как конструктивного строительного материала. Известно, что бетон, обладая высокой прочностью на сжатие, в 10—20 раз хуже сопротивляется растяжению, что практически не позволяет использовать его как конструктивный материал для выполнения растянутых и изгибаемых элементов несущих конструкций.

Под *железобетонными конструкциями* будем понимать несущие элементы зданий и сооружений, изготавливаемые из железобетона, и различные сочетания этих элементов.

Стальные стержни, имеющиеся в железобетонных конструкциях, принято называть *арматурой*. Работая совместно с бетоном, они хорошо сопротивляются как растяжению, так и сжатию.

Идея железобетона состоит в том, чтобы в железобетонных конструкциях использовать бетон преимущественно в работе на сжатие, а арматуру — в работе на растяжение. Это позволяет значительно расширить область применения бетона как конструктивного строительного материала. Идею железобетона можно достаточно хорошо проиллюстрировать следующим примером.

Бетонная балка (без арматуры), лежащая на двух опорах и подверженная поперечному изгибу, испытывает растяжение продольных волокон в зоне, находящейся ниже нейтрального слоя (рис. В.1, а). Такая балка обладает малой несущей способностью вследствие слабого сопротивления бетона растяжению. Она разрушается внезапно (хрупко) при возникновении первой же трещины в бетоне растянутой зоны. Прочность бетона на сжатие в момент, предшествующий разрушению, в бетонной балке сильно недоиспользуется (напряжения в нормальных сечениях в сжатой зоне в этот момент едва достигают 5... 10 % от прочности бетона на сжатие).

Железобетонная балка (рис. В.1, б), снабженная небольшим по площади количеством продольной арматуры по сравнению с пло-

щадью поперечного сечения балки, размещенной в растянутой зоне, может иметь несущую способность, до 20 раз превосходящую несущую способность бетонной балки. Характер разрушения железобетонной балки при не слишком большом насыщении ее сечений арматурой плавный, постепенный (пластичный). В такой конструкции может быть полностью использована прочность бетона в работе на сжатие, а арматуры — на растяжение.

Арматуру, имеющую весьма высокое сопротивление сжатию, можно также использовать и для усиления бетона, работающего на сжатие. Арматура может быть не только в виде стальных стержней. В качестве арматуры иногда используют нити, канаты, пряжи из стекловолокна и даже деревянные или бамбуковые рейки.

Применение неметаллической арматуры требует специально обоснования.

С 1938 г. в нашей стране и за рубежом постоянно ведутся исследования по армированию бетона стеклянными волокнами. Это объясняется тем, что сырье для получения стекловолокна имеется повсеместно, а технология его изготовления несложная. Применение арматуры из стекловолокна позволило бы не только экономить сталь, но и создавать такие конструкции, которым по условиям эксплуатации необходимо придавать диэлектрические и антимагнитные свойства, а также повысить стойкость против атмосферной и электрохимической коррозии. Элементарное стеклянное волокно технического назначения по прочности примерно соответствует высокоуглеродистой холоднотянутой проволоке ( $\approx 1500$  МПа), а по плотности — в 3—5 раз меньше. Зависимость между напряжениями и деформациями арматуры из стекловолокна остается линейной вплоть до ее разрыва, а деформации при разрыве достигают 2,5%. Однако стекловолокно обладает пониженной длительной прочностью, а его модуль упругости значительно ниже модуля упругости стали (не более 40 000 МПа). Сто-

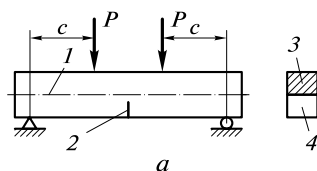
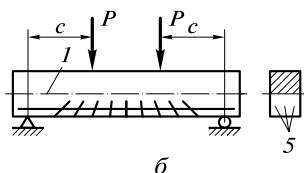


Рис. В.1. Схемы разрушения балок:

*a* — бетонная балка; *б* — железобетонная балка; *1* — нейтральная ось; *2* — трещина; *3* — сжатая зона; *4* — растянутая зона; *5* — стальные стержни (арматура); *c* — расстояние от линии действия силы *P* до оси опоры



имость такой арматуры значительно выше, чем стальной, поэтому повсеместное ее использование нецелесообразно.

Проводятся экспериментальные и теоретические исследования по применению неметаллической арматуры в таких конструкциях, как напорные трубы, железнодорожные шпалы, фундаменты под опоры контактных сетей и некоторые элементы подземных конструкций.

В настоящее время развиваются в основном два способа армирования бетона стекловолоконной арматурой:

- дисперсный — стекловолокном;
- сосредоточенный — стеклопластиковой проволокой, лентами или отдельными стержнями периодического профиля.

Большинство исследователей отдает предпочтение сосредоточенному способу армирования стеклопластиковой проволокой, лентами или стержнями, собираемыми в единое целое из элементарных стекловолокон диаметром 10... 15 мк посредством фенолоформальдегидной, полиэфирной или эпоксидной смолы или их модификаций. Опыты показывают, что для конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой, противопоказаны автоклавная обработка и пропаривание при высокой температуре (свыше 60 °С).

В связи с перечисленными обстоятельствами в настоящее время в строительстве применяется преимущественно стальная арматура.

Основой совместной работы бетона и арматуры (одинаковые деформации их смежных волокон) в железобетоне является выгодное природное сочетание некоторых важных физико-механических свойств этих материалов:

- при твердении бетона между ним и поверхностью стальной арматуры возникают значительные силы сцепления, вследствие чего в железобетонных элементах под нагрузкой оба материала деформируются совместно;

- плотный бетон (с достаточным содержанием цемента от 200... 250 до 300... 400 кг/м<sup>3</sup> и более) надежно защищает заключенную в нем стальную арматуру от коррозии, а также предохраняет ее от непосредственного воздействия огня и от механических повреждений;

- сталь и бетон обладают близкими по величине коэффициентами температурного (линейного) расширения:  $\alpha_{st}$ ,  $\alpha_{bt}$ , поэтому при изменении температуры в пределах до 100 °С (от -50 °С до 50 °С) в обоих материалах возникают незначительные начальные (внутренние) напряжения и скольжения арматуры в бетоне не наблюдается;  $\alpha_{st} = 0,000012 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_{bt} = 0,00001 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

**Достоинства и недостатки железобетона.** К основным достоинствам железобетона, обеспечивающим ему широкое приме-

нение в строительстве, относятся: огнестойкость, долговечность, высокая механическая прочность при сжатии, хорошая сопротивляемость сейсмическим и другим динамическим воздействиям, возможность возводить конструкции любой формы, малые эксплуатационные расходы на содержание зданий и сооружений (по сравнению с металлическими и деревянными конструкциями), хорошая сопротивляемость атмосферным воздействиям, высокая гигиеничность, способность задерживать радиоактивные излучения, почти повсеместное наличие крупных и мелких заполнителей, в больших количествах идущих на приготовление бетона, — все это делает железобетон доступным к применению практически на всей территории страны. Затраты электроэнергии на производство железобетонных конструкций значительно ниже по сравнению с затратами на металлические и каменные.

К недостаткам железобетона относятся: большая плотность, высокая звуко- и теплопроводность, трудоемкость переделок и усилений; необходимость выдержки конструкции в опалубке до приобретения ею требуемой прочности, появление трещин вследствие усадки и силовых воздействий. Многие из этих недостатков могут быть полностью или частично устранены путем применения бетонов на пористых заполнителях, специальной обработки (пропаривания, вакуумирования и т. п.), широкого использования различных добавок для бетона, предварительного напряжения.

В связи с суровыми климатическими условиями во многих регионах России при выполнении работ в зимнее время при приготовлении бетона нередко используются противоморозные добавки (хлористые соли, углекислый калий, азотистокислый натрий), которые обеспечивают твердение бетона при температурах до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Добавку принимают в размере не более 15 % от массы цемента. Большее содержание добавки вызывает коррозию арматуры.

В последние годы в связи с появлением суперпластификаторов и высокодисперсных кремнесодержащих материалов (микрокремнезема) в технологии производства бетона произошел значительный перелом, который может существенно уменьшить технологические трудности, связанные с бетонированием густоармированных конструкций. Рациональное сочетание уже упомянутых добавок и в некоторых случаях небольших количеств иных органических и минеральных компонентов позволяет придавать бетону технологические и конструктивные свойства, характерные для материалов высоких технологий.

Такие бетоны за рубежом получили название «бетон высокой функциональности» (High performance concrete). Этот новый материал отличается не только высоким качеством, но и тем, что на каждом этапе своего существования наилучшим образом соответ-

ствуется требованиям данного конкретного этапа. Так, например, при укладке этот бетон обладает хорошей удобоукладываемостью, при твердении быстро набирает высокую (до 80 МПа) и сверхвысокую (свыше 80 МПа) прочность, а в период эксплуатации имеет высокую долговечность.

В течение последних нескольких лет ведущие зарубежные компании самое серьезное внимание уделяют внедрению в строительную практику так называемого самоуплотняющегося бетона (Self-compacting concrete), преимущества которого очевидны из самого названия материала. Зачастую только такой бетон благодаря его высокой текучести позволяет выполнять конструкции с очень высоким насыщением арматурой. Самоуплотняющийся бетон набирает прочность примерно на 40 % быстрее обычного, при этом его стоимость на 10 % ниже стоимости обычного бетона за счет исключения процесса вибрирования при изготовлении конструкций. Помимо снижения трудозатрат повышается качество поверхностей изделий.

Отказ от вибрирования при применении самоуплотняющегося бетона не только ведет к экономии электроэнергии, времени и трудозатрат, но и не снижает качества железобетонных конструкций, повышает износостойкость и долговечность опалубки на стройплощадках и формооснастки на заводах сборного железобетона. Кроме того, вносится определенный вклад в дело защиты здоровья рабочих. В связи с этим возрастает социальная привлекательность труда людей, занятых на производстве бетонных работ.

Значительный научный задел позволил японским строителям сделать существенный скачок в деле быстрого внедрения самоуплотняющегося бетона. Так, по данным Бюллетеня Британской цементной ассоциации, с 2003 г. в Японии свыше 50 % всего объема бетона будет готовиться с использованием самоуплотняющихся композиций. В Великобритании самоуплотняющийся бетон также уже используется ведущими строительными фирмами в промышленных масштабах. Так, например, крупнейший производитель товарного бетона RMC ReadyMix поставлял самоуплотняющийся бетон высокой прочности для бетонирования густоармированных колонн торгового центра Midsummer Place.

При общей оценке железобетона как строительного материала следует иметь в виду, что отмеченные ранее недостатки малозначительны по сравнению с его достоинствами. Это привело к тому, что за исторически короткий промежуток времени (примерно 160 лет) железобетон занял доминирующее положение в строительстве. По уровню технических и экономических показателей бетон и железобетон являются основными конструктивными материалами в строительстве. Ежегодное производство бетона и же-



лезобетона в мире превышает 3 млрд м<sup>3</sup>, никакой другой продукт производственной деятельности не изготавливается в таких больших объемах. Из 2,8 млрд м<sup>2</sup> жилого фонда России на здания, построенные с применением бетона и железобетона, приходится не менее 2 млрд м<sup>2</sup>.

На изготовление железобетонных конструкций расход стали в 2,5—3,5 раза меньше, а на изготовление настилов, труб, бункеров, силосов и других железобетонных конструкций расходуется стали примерно в 10 раз меньше, чем на аналогичные стальные конструкции. Железобетонные конструкции более долговечны и огнестойки, поэтому замена металлических конструкций на железобетонные (там, где это возможно) позволяет экономить дефицитный металл и имеет важное экономическое значение.

Из железобетона выполняют многие конструкции, в которых большая масса не является недостатком, а иногда даже и полезна (например, в гидротехнических сооружениях (бетонные плотины), подпорных стенках, фундаментах).

**Области применения железобетона.** Для современного капитального строительства железобетон является строительным материалом № 1. Его применяют в самых разнообразных отраслях строительства. Из железобетона проектируют и строят многие здания и сооружения промышленного, гражданского и транспортного назначения. Железобетон широко применяют в гидротехническом (плотины, дамбы, гидроэлектростанции) и энергетическом строительстве (для возведения главных корпусов тепловых и атомных электростанций, атомных реакторов), а также нередко в судостроении (например, из железобетона изготавливают корпуса барж) и машиностроении (для изготовления станин и опорных частей тяжелых станков и прессов). Из железобетона возводят жилые дома, общественные здания различного назначения, сельскохозяйственные постройки и различные инженерные сооружения (дымовые трубы, телевизионные и водонапорные башни, резервуары и т. д.). В транспортном строительстве железобетонные конструкции применяют для возведения мостов, водопропускных труб, путепроводов, метрополитенов, тоннелей на железных и автомобильных дорогах, подпорных стенок. Их употребляют также для покрытия дорог и аэродромов. Многие здания и сооружения на железнодорожном транспорте построены с применением железобетонных конструкций. К ним относятся железнодорожные вокзалы, локомотивные и вагоноремонтные депо, пассажирские платформы. При строительстве железных дорог в настоящее время широко применяют железобетонные шпалы, опоры контактной сети и другие железобетонные конструкции. В горной промышленности железобетон используют для надшахтных сооружений и крепления подземных выработок.

В последние десятилетия железобетон стали использовать при возведении платформ для добычи нефти со дна морей в зоне шельфа и устройства саркофагов и скафандров для захоронения радиоактивных отходов и хранения радиоактивных материалов.

По способу возведения различают железобетонные конструкции: сборные, изготавливаемые преимущественно на заводах строительной индустрии и затем монтируемые на строительных площадках; монолитные, полностью возводимые на месте строительства; сборно-монолитные, в которых рационально сочетается использование сборных железобетонных элементов заводского изготовления и монолитного бетона. В настоящее время сборные железобетонные конструкции в наибольшей степени отвечают требованиям индустриализации строительства, хотя следует отметить, что и монолитный бетон в последнее время с каждым годом получает все большее применение.

Прогнозы показывают, что в XXI в. железобетон останется основным строительным материалом для несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения.

**Краткие исторические сведения о возникновении и развитии железобетона.** Развитие строительных конструкций, в том числе и железобетонных, неразрывно связано с условиями материальной жизни общества. Появление железобетона во второй половине XIX в. совпало по времени с периодом ускоренного развития промышленности, торговли и транспорта. В этот период возникла потребность в строительстве большого числа фабрик, заводов, мостов, портов и других сооружений, вследствие этого увеличилась потребность в строительных материалах. С одной стороны, это привело к подорожанию уже известных материалов, а с другой — послужило толчком к появлению новых строительных материалов. При строительстве мостов и многих промышленных зданий с дорогим и сложным оборудованием стала ощущаться острая потребность в новых огнестойких, дешевых и надежных в эксплуатации строительных конструкциях. Все это привело к появлению нового строительного материала — железобетона, в котором удачно сочетались лучшие качества каменных материалов и стали.

В 2009 г. исполнилось 160 лет со времени изобретения железобетона. Хотя на звание родины этого материала претендовали Великобритания и США, приоритет все-таки следует отдать Франции. Французы и мировое сообщество подчеркнули этот факт, отпраздновав столетие железобетона в 1949 г.

Появление железобетона вызвало революционные преобразования в строительстве. В XX в. железобетон получил широкое распространение как материал, имеющий обширную сырьевую

базу, экологически безопасный, наиболее подходящий для изготовления различных строительных изделий, конструкций и систем.

Историю развития железобетонных конструкций можно условно разделить на четыре периода.

1. Период возникновения железобетона (1849—1885 гг.). Характеризуется появлением первых конструкций из армированного бетона. В этот период железобетонные конструкции появились практически одновременно в нескольких высокоразвитых странах (Франции, Великобритании, США и Германии), где уже производился цемент и стальной прокат.

Первым документально зафиксированным изделием из железобетона явилась лодка, построенная в 1849 г. Жаном Луи Ламбо (Франция), адвокатом по профессии. В 1854 г. штукатур из Нью-Йорка Вильям Уилкинсон получил патент на конструкцию огнестойкого перекрытия, состоящего из железных полос, укладываемых на расстоянии 50 см друг от друга и заливаемых бетоном. Причем для повышения прочности перекрытия в пролете полосы укладывались в нижней части сечения, а над опорами отгибались в верхнюю часть. В. Уилкинсон был первым, кто понял принцип рационального армирования железобетона. В 1867 г. французский садовник Жозеф Монье получил патент на изготовление кадок для цветов из железа и цемента. Длительное время (особенно в России) Ж. Монье считался изобретателем железобетона. Он получил во многих странах множество разнообразных патентов на конструкции из железобетона (шпалы, трубы, балки и даже мосты). В 1880 г. патент на железобетон был получен им и в России.

На развитие железобетона в Великобритании большое влияние оказал французский инженер Франсуа Генебик. Его фирма выиграла несколько подрядов на сооружение различных зданий. Им были построены мельницы, силосы для хранения зерна, водонапорные башни, портовые сооружения и др.

В 1864 г. Франсуа Куанье построил во Франции первую церковь из железобетона. В 1861 г. он опубликовал брошюру «Применение бетона в строительном искусстве», где впервые указал на соединение бетона и стальных стержней в нем. В течение 20 лет Ф. Куанье строил железобетонные сооружения во Франции и в других странах.

В России впервые железобетон был использован в 1879 г. инженером Д. Ф. Жаринцевым при возведении стен зданий в Батуми. Однако исследования покрытий Екатерининского дворца в Царском Селе показали, что русские мастера еще в 1802 г. применяли армированный бетон, но не считали, что получили новый строительный материал, и не запатентовали его.

В 1885 г. в Германии инженер Г. Вайс и профессор И. Баушингер провели первые научные опыты по определению прочности и огнестойкости железобетонных конструкций, сохранности стали в бетоне, сил сцепления арматуры с бетоном и пр. Тогда же впервые инженер М. Кёнен высказал предположение, затем подтвержденное опытами, что арматура должна располагаться в тех частях конструкции, где можно ожидать появление растягивающих усилий.

2. Период освоения железобетона в строительстве (1886—1917 гг.). В России с 1886 г. железобетон стал применяться для устройства междуэтажных перекрытий по стальным балкам. Много таких перекрытий встречается в Санкт-Петербурге в зданиях старой постройки. В России развитие железобетонных конструкций шло под влиянием зарубежного опыта и отечественной практики.

Начало широкому использованию железобетона в России положили проведенные в Санкт-Петербурге в 1891 г. под руководством профессора Института путей сообщения Н. А. Белелюбского публичные испытания различных железобетонных конструкций (плит, балок, труб, резервуаров, арочного моста пролетом 17 м и др.). Эти испытания выявили большие преимущества железобетона перед другими строительными материалами. В 1904 г. при участии профессора Н. А. Белелюбского в Николаеве был построен первый в мире железобетонный морской маяк высотой 40,2 м со стенами толщиной 10 см сверху и до 20 см внизу (рис. В. 2).

В 1900 г. на Парижской всемирной выставке железобетон был официально признан надежным строительным материалом. Но уже с 1898 г. железобетонные конструкции нередко применялись в России при строительстве железнодо-

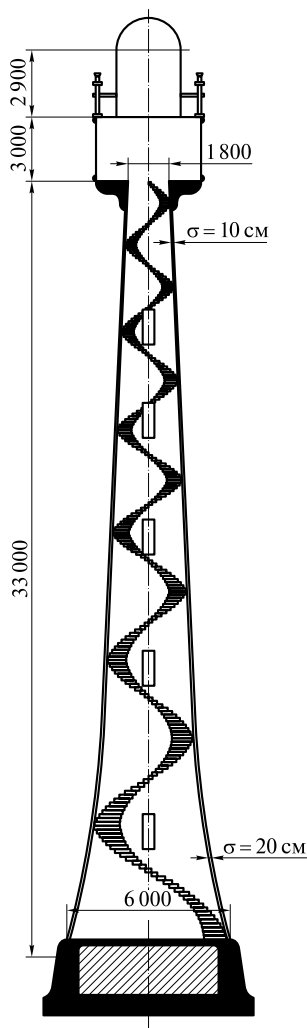


Рис. В.2. Железобетонный маяк в Николаеве:

$\sigma$  — переменная толщина стенки

рожных сооружений, шоссежных дорог, в промышленном и гражданском строительстве. За несколько лет было построено более 30 железобетонных путепроводов и мостов. В России в 1908 г. впервые в мире были утверждены технические условия на железнодорожные сооружения из железобетона.

Первая конструкция железобетонной шпалы была предложена еще в 1880 г. во Франции, но начало практического применения железобетонных шпал как в нашей стране, так и за рубежом относится к 1902 — 1903 гг. Первые железобетонные шпалы в России были изготовлены в 1903 г. и испытаны в лаборатории института путей сообщения Санкт-Петербурга. Часть этих шпал была уложена на одной из станций Финляндской (ныне Октябрьской) железной дороги. Вслед за этим в период 1903 — 1927 гг. попытки применения железобетонных шпал на наших дорогах предпринимались неоднократно. Однако широкое применение таких шпал началось только в послевоенный период.

В 1908 г. профессор А. Ф. Лолейт запроектировал и построил в Москве четырехэтажный склад молочных продуктов с безбалочными перекрытиями. С этого момента железобетон в России начал постепенно вытеснять сталь и дерево при выполнении несущих конструкций зданий и сооружений.

Значительные по размаху и глубине исследования несущей способности и трещиностойкости железобетонных конструкций были проведены в конце XIX в. и начале XX в. в Германии под руководством профессоров Е. Мёрша, К. Баха, О. Графа, Ф. Эмпергера. Полученные результаты были положены в основу разработки теории железобетона и нормативных документов по проектированию таких конструкций.

3. Первый период широкого применения железобетона в нашей стране (1918 — 1945 гг.). Особенно большое распространение он получил в промышленном и гидротехническом строительстве. После революции в октябре 1917 г. произошли коренные изменения в экономике страны. Сразу после окончания гражданской войны перед руководством страны встали задачи восстановления разрушенного хозяйства и выполнения все возрастающих планов капитального строительства. Решение этих проблем в то время было бы невозможно без широкого применения железобетона.

В годы первых пятилеток вследствие больших объемов строительства и тенденции экономии стали, необходимой для нужд машиностроения, железобетон постепенно занимает доминирующее положение в капитальном строительстве. Широкое распространение получили монолитные неразрезные балочные перекрытия, многопролетные и многоярусные рамы (этажерки), арки, элеваторы, силосы, бункеры.

В стране начиналось строительство крупных электростанций с широким применением бетона и железобетона (Волховская, Свирская, Днепровская ГЭС).

В 1928 г. в России появились первые сборные железобетонные конструкции, которые затем стали все шире применяться в промышленном и гражданском строительстве.

Первый дом из сборного железобетона был построен в 1930 г. в Москве. У истоков инженерного решения этого дома стояли выдающиеся российские инженеры А. Ф. Лолейт, Е. В. Костырко, А. А. Гвоздев.

В это же время начинают применяться тонкостенные пространственные конструкции: купола (первый тонкостенный купол диаметром 28 м был возведен в Москве для планетария в 1928 г.; оперный театр в Новосибирске в 1934 г. был перекрыт куполом диаметром 55,5 м, который имел толщину оболочки всего 8 см), склады, цилиндрические оболочки, шатры и т. п. В этот период началось проектирование и строительство Московского метро.

Появление сталей и бетонов высокой прочности позволило реализовать на практике в 1928—30-е гг. идею создания предварительно-напряженных железобетонных конструкций. Впервые этого добился талантливый французский ученый и инженер Эжен Фрейссин.

Предварительно-напряженные железобетонные конструкции обладают повышенной трещиностойкостью и жесткостью, а также экономичны за счет уменьшения размеров сечений. Это позволяет значительно увеличить пролеты зданий и сооружений, перекрываемых железобетонными конструкциями.

Первые теоретические основы расчета железобетонных конструкций и принципов их конструирования были созданы трудами первых исследователей железобетона А. Консидером, Ф. Генебиком (Франция), М. Кёненом и Е. Мёршем (Германия). К концу XIX в. в общих чертах сложилась теория расчета железобетонных конструкций по допускаемым напряжениям, основанная на принципах сопротивления упругих материалов. (Как выяснилось в дальнейшем, она имеет крупные недостатки.)

Бурный рост применения железобетона вызвал необходимость совершенствования теории. Большой вклад в ее дальнейшую разработку внесли русские и советские ученые А. Ф. Лолейт (теория расчета по разрушающим усилиям, этот метод расчета применялся в СССР с 1938 по 1955 гг.), В. М. Келдыш, А. А. Гвоздев, С. М. Крылов (разработка метода расчета по предельным состояниям, теория расчета статически неопределимых конструкций по методу предельного равновесия), В. И. Мурашев (теория трещиностойкости и жесткости железобетона), И. И. Улицкий,

А. Е. Шейкин, П. И. Васильев, С. В. Александровский (исследования по теории ползучести бетона), К. В. Михайлов, Н. М. Мулин (разработка и исследование новых видов арматуры), В. В. Михайлов, Г. И. Бердичевский, С. А. Дмитриев, А. П. Коровкин (разработка и исследование предварительно-напряженных железобетонных конструкций), С. С. Давыдов (расчет и конструирование подземных сооружений) и многие другие.

4. Второй период широкого применения железобетона. В нашей стране начался в 1946 г. и продолжается по настоящее время.

После окончания Второй мировой войны весьма резко возросла потребность в новом строительстве, и положение железобетона среди других строительных материалов стало доминирующим.

Железобетон стал основой не только промышленного и гидротехнического строительства, но и жилищного, теплоэнергетического, транспортного, дорожного, сельскохозяйственного.

Началом бурного развития сборного железобетона в СССР послужило известное постановление ЦК КПСС и Совета министров СССР «О развитии производства сборных железобетонных конструкций и деталей для строительства», принятое 19 августа 1954 г. Широкое применение сборного железобетона совершило переворот в строительной технике. Появились заводские технологии изготовления железобетонных конструкций. Претерпели большие изменения конструктивные формы зданий и сооружений в связи с переходом на полносборное строительство. Была создана обширная номенклатура типовых сборных железобетонных изделий для массового применения (балки, фермы, панели, фундаментные блоки, дорожные и аэродромные плиты покрытия и др.). Использование сборного железобетона позволило вести строительство круглогодично и в огромных масштабах. Если объем применения сборных конструкций в СССР в 1955 г. составил 12 %, то в 1990 г. он составлял уже около 60 % от общего объема производства железобетона. За 30 лет (с 1955 по 1985 гг.) объем применения сборного железобетона увеличился в 25 раз.

Производство сборного железобетона по Российской Федерации в настоящее время составляет примерно 30 млн м<sup>3</sup> в год, из них предварительно-напряженных конструкций — около 4 млн м<sup>3</sup>.

Дальнейшим развитием теории железобетона стал созданный в нашей стране и применяемый с 1955 г. единый метод расчета всех строительных конструкций по предельным состояниям, разработанный профессорами Н. С. Стрелецким, В. М. Келдышем, А. А. Гвоздевым и др.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования, накопленный опыт строительства и достижения в области улучшения качества строительных материалов позволили за ис-

торически короткий срок значительно повысить уровень железобетонных конструкций. Об огромных возможностях железобетона как строительного материала наглядно свидетельствуют такие здания и сооружения:

- башня московского телецентра в Останкино высотой 537 м с 385-метровой нижней предварительно-напряженной частью из монолитного железобетона (рис. В.3, б).

- торговый центр в Челябинске, перекрытый без промежуточных опор пологой сборно-монолитной оболочкой с размерами в плане  $102 \times 102$  м;

- крытый рынок в Минске (Беларусь), перекрытый пологой сборно-монолитной оболочкой из аглопоритобетона с размерами в плане  $103 \times 103$  м. Существуют реальные возможности для перекрытия такими оболочками плана  $150 \times 150$  м и более. В частности, Проектный институт № 1 Министерства строительства

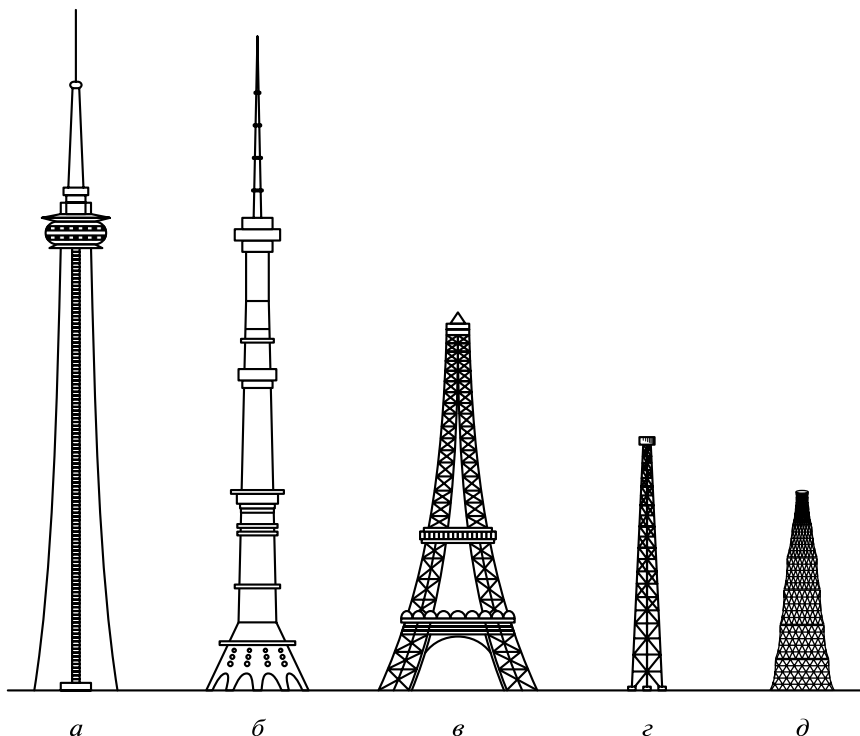


Рис. В.3. Башни, построенные в разных странах:

*а* — в Торонто, 550 м (Канада); *б* — башня Московского телецентра в Останкино, 537 м (Россия); *в* — Эйфелева башня в Париже, 324 м (Франция); *г* — типовая радиобашня, 205 м (Россия); *д* — башня Шухова в Москве, 160 м (Россия)



План покрытия с разрезкой на панели

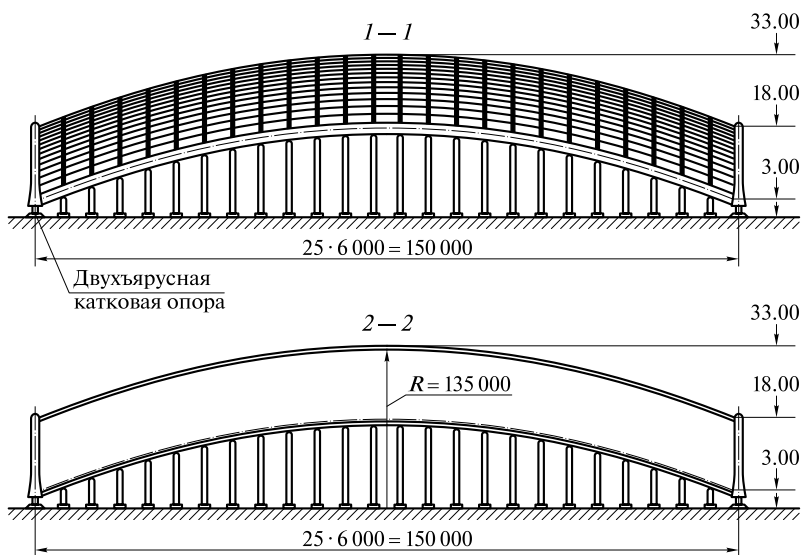
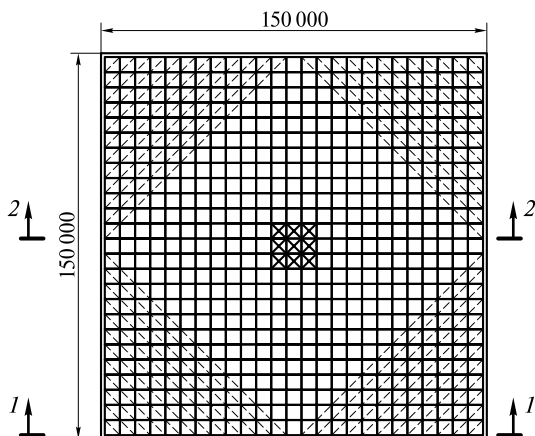


Рис. В.4. Оболочка, очерченная по круговой поверхности переноса, для покрытия стоянки машин в Новосибирске (Россия)

разработал проект оболочки, очерченной по круговой поверхности переноса, для покрытия стоянки машин в Новосибирске с размерами в плане  $150 \times 150$  м (рис. В. 4);

- в Париже (Франция) оболочкой, представляющей в плане правильный треугольник со стороной 218 м, перекрыт выставочный павильон Дворца техники (рис. В. 5). Оболочка опирается

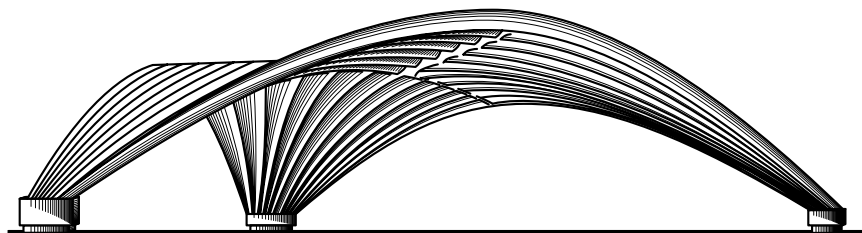


Рис. В.5. Оболочка в виде правильного треугольника, которой перекрыт Дворец техники в Париже (Франция)

на три точки и перекрывает площадь 30 000 м<sup>2</sup>. Толщина ее всего 100 мм. Поперечное сечение волнистое. Высота гофра 600 мм;

- в Сиэтле (США) построен монолитный ребристый купол диаметром 200 м;

- в США и во многих других странах построены сотни небоскребов с монолитным каркасом. Для таких зданий применяют бетон высокой прочности. В 1998 г. в Чикаго (США) закончилось строительство небоскреба Миглин Вайтер (125 этажей, высота 610 м) с железобетонным каркасом;

- скульптура Родина-мать в Волгограде;
- дымовые трубы высотой до 420 м;
- тоннель под проливом Ла-Манш между Францией и Великобританией, проект которого реализован в сборном железобетоне.

В настоящее время железобетон является основным конструктивным материалом в строительстве, так как он обладает высокой прочностью, долговечностью, стойкостью к воздействию высоких температур и агрессивных сред, способностью твердеть и наращивать прочность под водой, допускает изготовление конструкций самой разнообразной формы и не требует практически эксплуатационных расходов.

Большинство всех несущих строительных конструкций сейчас выполняют из железобетона; многие из конструкций монтируют из сборных элементов. Такое положение сохранится, видимо, и в обозримом будущем. Однако в последние десятилетия произошла некоторая переоценка ценностей в отношении применения сборного и монолитного железобетона. С учетом значительного повышения удельного веса транспортных расходов необходимо добиваться взвешенного соотношения между сборным и монолитным строительством за счет совершенствования технологии изготовления конструкций из монолитного железобетона и развития сборно-монолитных конструктивных решений. Кроме того, монолитное строительство требует на 40...45 % меньших затрат на создание производственной базы.

Итогом обобщения научных исследований и опыта проектирования за последние десятилетия явились действующие в настоящее время нормы проектирования бетонных и железобетонных конструкций СНиП 52-01-2003 и дополняющие их нормативные документы. В настоящее время заканчивается разработка нового комплекса нормативных документов для бетонных и железобетонных конструкций. Он основан на новых методических принципах построения и содержания нормативных документов, изложенных в СНиП 10-01-93 «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения».

Дальнейшее развитие современной цивилизации невозможно представить без железобетона. Например, обеспечение российского населения жильем, создание безопасной среды обитания в наших городах зависит от развития производства основного строительного материала современности — железобетона.

# ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

## Внешние нагрузки

- $g$  — постоянная распределенная линейная, Н/м, или поверхностная, МПа, нагрузка (собственный вес конструкций);  
 $v$  — распределенная временная (полезная) нагрузка, Н/м (МПа);  
 $q$  — распределенная полная нагрузка, Н/м (МПа);  
 $F$  — сосредоточенная сила, кН.

## Усилия от внешних нагрузок и воздействий в нормальном сечении элемента

- $M$  — изгибающий момент, кН · м;  
 $M_p$  — изгибающий момент с учетом момента усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения;  
 $N, Q$  — продольная и поперечная силы.

## Характеристики предварительно-напряженного элемента

- $P, N_p$  — усилия предварительного обжатия с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре, соответствующих рассматриваемой стадии работы элемента;  
 $P_1, P_2$  — усилие в напрягаемой арматуре с учетом соответственно первых и всех потерь предварительного напряжения;  
 $\sigma_{sp}, \sigma'_{sp}$  — предварительные напряжения соответственно в напрягаемой арматуре  $A_{sp}$  и  $A'_{sp}$  до обжатия бетона или в момент снижения величины предварительного напряжения в бетоне до нуля под воздействием на элемент внешних фактических или условных сил, определяемые с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре, соответствующих рассматриваемой стадии работы элемента;  
 $\Delta\sigma_{sp}$  — потери предварительного напряжения в арматуре;  
 $\sigma_{bp}$  — сжимающие напряжения в бетоне в стадии предвари-

тельного обжатия с учетом потерь предварительного напряжения в арматуре;  
 $\gamma_{sp}$  — коэффициент точности натяжения арматуры.

### Характеристики материалов

- $R_{b,n}$  — нормативное сопротивление бетона осевому сжатию;
- $R_b, R_{b,ser}$  — расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
- $R_{bt,n}$  — нормативное сопротивление бетона осевому растяжению;
- $R_{bt}, R_{bt,ser}$  — расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
- $\bar{R}_b, \bar{R}_{bt}$  — соответственно средний предел прочности стандартных бетонных образцов на осевое сжатие и на осевое растяжение;
- $R_{bp}$  — передаточная прочность бетона;
- $R_b^p, R_{bt,ser}^p, R_{b,ser}^p$  — расчетные сопротивления бетона соответственно  $R_b, R_{bt,ser}, R_{b,ser}$  при классе бетона, равном передаточной прочности  $R_{bp}$ ;
- $R_{bond}$  — расчетное сопротивление сцепления арматуры с бетоном;
- $R_s, R_{s,ser}$  — расчетное сопротивление арматуры растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;
- $R_{sw}$  — расчетное сопротивление поперечной арматуры растяжению;
- $R_{sc}$  — расчетное сопротивление арматуры сжатию для предельных состояний первой группы;
- $\sigma_{s, crc}$  — напряжение (приращение напряжений в предварительно-напряженном элементе) в продольной растянутой арматуре в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;
- $E_b$  — начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении;
- $E_{b,red}$  — приведенный модуль деформации сжатого бетона;
- $E_s$  — модуль упругости арматуры;
- $E_{s,red}$  — приведенный модуль деформации арматуры;

- ры, расположенной в растянутой зоне элемента с трещинами;
- $\varepsilon_{b0}, \varepsilon_{b\theta 0}$  — предельная относительная деформация бетона соответственно при равномерном осевом сжатии и осевом растяжении;
- $\varepsilon_{s0}$  — относительные деформации арматуры при напряжении, равном  $R_s$ ;
- $\varphi_{b, cr}$  — коэффициент ползучести бетона;
- $\alpha$  — отношение соответствующих модулей упругости арматуры  $E_s$  и бетона  $E_b$ .

### Характеристики положения продольной арматуры в нормальном сечении элемента

- $S$  — продольная арматура (напрягаемая и ненапрягаемая), расположенная в растянутой зоне сечения или у менее сжатой его грани;
- $S'$  — продольная арматура, расположенная в сжатой зоне сечения или у более сжатой его грани;
- $A_{sp}, A'_{sp}$  и  $A_s, A'_s$  — площадь сечения напрягаемой и ненапрягаемой частей арматуры  $S$  и  $S'$ ;
- $a, a'$  — расстояния от равнодействующей усилий в арматуре  $S$  и  $S'$  до ближайшей грани;
- $a_{sp}, a'_{sp}$  — расстояния от равнодействующей усилий в арматуре площадью  $A_{sp}$  и  $A'_{sp}$  до ближайшей грани;
- $a_s, a'_s$  — расстояния от равнодействующей усилий в арматуре площадью  $A_s$  и  $A'_s$  до ближайшей грани.

### Геометрические характеристики

- $b$  — ширина прямоугольного сечения; ширина ребра таврового и двутаврового сечения;
- $b_f, b'_f$  — ширина полки таврового и двутаврового сечений соответственно в растянутой и сжатой зонах;
- $h$  — высота прямоугольного, таврового и двутаврового сечений;
- $h_f, h'_f$  — высота полки прямоугольного, таврового и двутаврового сечений соответственно в растянутой и сжатой зонах;
- $h_0$  — рабочая высота сечения,  $h_0 = h - a$ ;
- $x$  — высота сжатой зоны бетона в предельном состоянии по прочности;
- $x_N$  — высота сжатой зоны при расчете по деформациям;

- $\xi$  — относительная высота сжатой зоны бетона,  $\xi = x/h_0$ ;  
 $s_w$  — расстояние между хомутами, измеренное по длине элемента;  
 $e_{0p}$  — эксцентриситет усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения;  
 $y_N$  — расстояние от нейтральной оси до точки приложения усилия предварительного обжатия с учетом изгибающего момента от внешней нагрузки;  
 $e_p$  — расстояние от точки приложения усилия предварительного обжатия  $N_p$  с учетом изгибающего момента от внешней нагрузки до центра тяжести растянутой или наименее сжатой арматуры;  
 $l_{an}$  — длина зоны анкеровки;  
 $l_p$  — длина зоны передачи предварительного напряжения с арматуры на бетон;  
 $d, d_w$  — номинальный диаметр стержней соответственно продольной и поперечной арматуры;  
 $A_{sw}$  — площадь сечения хомутов, расположенных в одной нормальной к продольной оси плоскости, пересекающей наклонное сечение;  
 $A$  — площадь всего бетона в поперечном сечении;  
 $A_{bt}$  — площадь сечения бетона растянутой зоны;  
 $A_{red}$  — площадь приведенного сечения элемента;  
 $I$  — момент инерции сечения всего бетона относительно центра тяжести сечения элемента;  
 $I_{red}$  — момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести;  
 $W$  — момент сопротивления сечения элемента для крайнего растянутого волокна.

# ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА, СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

## 1.1. Бетон

### 1.1.1. Общие сведения

Бетон, как материал для железобетонных конструкций, должен обладать определенными, наперед заданными физико-механическими свойствами: необходимой прочностью, хорошим сцеплением с арматурой, достаточной плотностью (непроницаемостью) для защиты арматуры от коррозии и др. Деформативность бетона не должна быть слишком большой.

Для изготовления бетонных и железобетонных конструкций применяются следующие виды бетонов:

- тяжелый, средней плотности свыше 2 200 до 2 500 кг/м<sup>3</sup> (на плотных заполнителях);
- мелкозернистый, средней плотности свыше 1 800 кг/м<sup>3</sup> (на мелких заполнителях);
- легкий, плотной и поризованной структуры (на пористых заполнителях);
- ячеистый автоклавного и неавтоклавного твердения.

В качестве плотных заполнителей применяют щебень из дробленых горных пород (песчаника, гранита, диабазы и др.) и кварцевый песок. Пористые заполнители могут быть естественными (перлит, пемза, ракушечник) или искусственными (керамзит, шлак и т. п.). В зависимости от вида пористых заполнителей различают керамзитобетон, шлакобетон, перлитобетон и т. д.

### 1.1.2. Структура (строение) бетона

В настоящее время в строительстве применяются различные виды бетона. Но для выполнения несущих конструкций зданий и сооружений наиболее широко используется тяжелый бетон на цементном вяжущем и крупном плотном заполнителе из песчаника, гранита, диабазы и других материалов со средней плотностью в пределах  $2\,200 < \rho \leq 2\,500$  кг/м<sup>3</sup>. Его свойства рассмотрим далее.



Структура бетона оказывает большое влияние на его прочность и деформативность (вспомним схему физико-химического процесса получения бетона).

Для приготовления бетона берут в определенных пропорциях инертные (песок, щебень или гравий), вяжущее (цемент), воду. Кроме того, для придания бетону различных свойств (например, морозостойкости) дополнительно в небольших количествах могут вводиться различные добавки. Смесь инертных и вяжущего заливают водой. После затворения этой смеси начинается химическое взаимодействие между частицами цемента и водой (гидратация), в результате чего образуется цементное тесто. При перемешивании такой смеси цементное тесто обволакивает зерна инертных и, постепенно затвердевая, превращает всю массу в монолитное твердое тело, способное нести нагрузку.

Следовательно, бетон представляет собой неоднородный искусственный каменный материал. Следует обратить внимание на то, что даже сам затвердевший цементный раствор (цементный камень) имеет также неоднородную структуру и состоит из упругого кристаллического сростка, растущего с течением времени, и наполняющей его вязкой студенистой массы (геля), количество которой постепенно уменьшается.

Структуру бетона можно представить в виде пространственной решетки из цементного камня (включающего в себя кристаллический сросток, гель и большое количество пор и капилляров, содержащих воздух, водяной пар и воду), в котором хаотично расположены зерна песка и щебня (рис. 1.1).

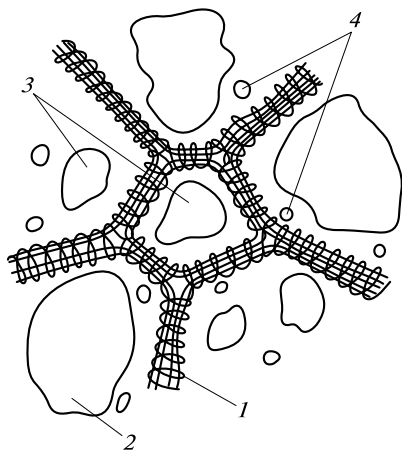


Рис. 1.1. Структура бетона:

1 — цементный камень; 2 — щебень; 3 — песок; 4 — поры, заполненные воздухом и водой

Процесс твердения бетона при благоприятных температурно-влажностных условиях может длиться годами и носит затухающий характер. Этот процесс является экзотермическим, т. е. он идет с выделением большого количества теплоты. Наиболее интенсивно набор прочности бетоном, приготовленным на портландцементе, идет в первые 28 сут твердения. По данным опытов образцы, хранившиеся в благоприятных температурно-влажностных условиях через 11 лет удвоили свою прочность по сравнению с 28-суточной. Наоборот, при хранении образцов в сухой среде нарастание их прочности через год практически прекращается.

Математически нарастание прочности во времени бетона, приготовленного на портландцементе, при положительной температуре твердения ( $\approx 15^\circ\text{C}$ ) и влажной среде может быть выражено следующей эмпирической зависимостью:

$$\bar{R}_t = \bar{R} \frac{\lg t}{\lg 28},$$

где  $\bar{R}$  — кубиковая прочность бетона в возрасте 28 сут;  $t$  — время твердения бетона, сут.

Отрицательная температура замедляет процесс твердения и даже прекращает его. После оттаивания способность к дальнейшему набору прочности может снижаться, если бетон к моменту замерзания набрал менее 60 % прочности от  $\bar{R}$ .

Важным фактором, влияющим на структуру и прочность бетона, является водоцементное отношение — отношение массы воды к массе цемента в единице объема бетонной смеси ( $W/C$ ). Для успешного протекания реакции схватывания цемента и процесса твердения цементного камня необходимо, чтобы  $W/C \geq 0,2$ . Однако для достижения хорошей удобоукладываемости бетонной смеси приходится принимать  $W/C = 0,35 \dots 0,70$ , т. е. вводить воду с избытком.

Излишек воды в дальнейшем постепенно испаряется, и в цементном камне образуются многочисленные каналы (называемые порами, или капиллярами), заполненные химически несвязанной водой, водяным паром и воздухом, которые оказывают давление на стенки. Это снижает прочность бетона и увеличивает его деформативность.

Общий объем пор в затвердевшем цементном камне достаточно велик и составляет при обычных условиях твердения бетона примерно 25...40 % от его видимого объема. Размеры поперечного сечения пор весьма малы: 60...80 % от общего количества всех пор имеют размеры поперечного сечения, не превышающие 0,001 мм. С уменьшением  $W/C$  пористость цементного камня уменьшается, а прочность бетона повышается. Кроме того, бето-

ны из жестких смесей ( $W/C = 0,3 \dots 0,4$ ) при прочих равных условиях требуют меньшего расхода цемента и обладают меньшей деформативностью.

Процессы постепенного уменьшения объема геля, кристаллообразования, испарения избыточной воды, происходящие в бетоне в течение длительного времени, обуславливают ряд его специфических свойств: изменение его прочности во времени, усадку, ползучесть.

### 1.1.3. Усадка бетона и начальные напряжения

Бетон обладает свойством уменьшаться в объеме при твердении в обычной воздушной среде (усадка бетона) и увеличиваться в объеме при твердении в воде или очень влажной среде (набухание бетона).

Усадка бетона происходит в результате усадки цементного камня. Она особенно интенсивно протекает в первые две недели твердения бетона. Через год ее можно считать практически закончившейся.

Как показывают опыты, величина усадки бетона зависит от следующих факторов:

- количество и вид цемента (его минералогический состав) — чем больше расход цемента на единицу объема бетона, тем (при прочих равных условиях) больше усадка. При этом бетоны, приготовленные на высокоактивных и глиноземистых цементах, дают большую усадку. Наименьшей усадкой обладают бетоны, приготовленные на портландцементе;

- количество воды — чем больше  $W/C$ , тем больше усадка;

- крупность заполнителей и их вид — при мелкозернистых песках и пористом щебне усадка больше. Чем выше способность заполнителей сопротивляться деформированию, т.е. чем выше их модуль упругости, тем усадка меньше. При разной крупности зерен заполнителей и меньшем объеме пустот меньше и усадка;

- влажность окружающей среды — чем ниже влажность, тем больше усадка;

- различные гидравлические добавки и ускорители твердения (например, хлористый кальций) — они, как правило, увеличивают усадку;

- пропаривание бетона — влияние пропаривания на процесс усадки изучено пока недостаточно; однако имеются данные о том, что после пропаривания усадка уменьшается примерно в 1,5 раза;

- использование заполнителей с глинистыми и пылевидными загрязнениями — усадочные деформации бетона могут увеличиться в несколько раз.