

2. Физико-механические свойства бетона

2.1. Классификация бетона

2.2. Структура бетона

2.3. Прочность бетона

2.3.1. Основы прочности

2.3.2. Наращение прочности бетона во времени

2.3.3. Прочность бетона при центральном сжатии

2.3.4. Прочность бетона при растяжении

2.3.5. Испытание бетонного образца на изгиб

2.3.6. Испытание бетонного образца на раскалывание

2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

2.3.8. Влияние на прочность бетона длительных и многократно повторных нагрузок

2.3.9. Влияние на прочность бетона высоких и низких температур

2.4. Деформации бетона

2.4.1. Виды деформаций

2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

2.4.3. Деформации бетона при однократном загрузении кратковременной нагрузкой

2.4.4. Деформации при длительном действии нагрузки

2.4.5. Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

2.5. Высококачественные конструктивные бетоны

2.1 Классификация бетона

Под **бетоном** понимают комплексный строительный материал, в котором крупные и мелкие каменные заполнители, соединенные вяжущим (цемент, жидкое стекло, полимерцемент), сопротивляются нагрузкам как одно монолитное целое.

Бетон как материал для железобетонных конструкций должен обладать вполне определенными, наперед заданными прочностными, деформативными и физическими свойствами.

Под прочностными свойствами бетона принято понимать нормативные и расчетные характеристики бетона при сжатии и растяжении, сцепление бетона с арматурой. Под деформативными свойствами бетона понимают сжимаемость и растяжимость бетона под нагрузкой, ползучесть и усадку, набухание и температурные деформации. К физическим свойствам бетона относят водонепроницаемость, морозо- и жаростойкость, коррозионную стойкость, огнестойкость, тепло- и звукопроводность, кислотостойкость и др.

Физико-механические свойства бетона зависят от:

- вяжущего;
- крупного и мелкого заполнителя;
- воды.

Они определяются структурой бетона и условиями твердения.



2.1 Классификация бетона

Согласно СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.» для изготовления бетонных и железобетонных конструкций предусмотрены следующие виды бетонов:

Тяжелый бетон – плотной структуры, на плотных заполнителях, крупно-зернистый, на цементном вяжущем, при любых условиях твердения.

Легкий бетон – бетон плотной структуры на пористых заполнителях, крупно-зернистый, на цементном вяжущем при любых условиях твердения.



2.1 Классификация бетона

Качество конструкционного бетона характеризуется классами и марками в зависимости от назначения железобетонных конструкций и условий эксплуатации.

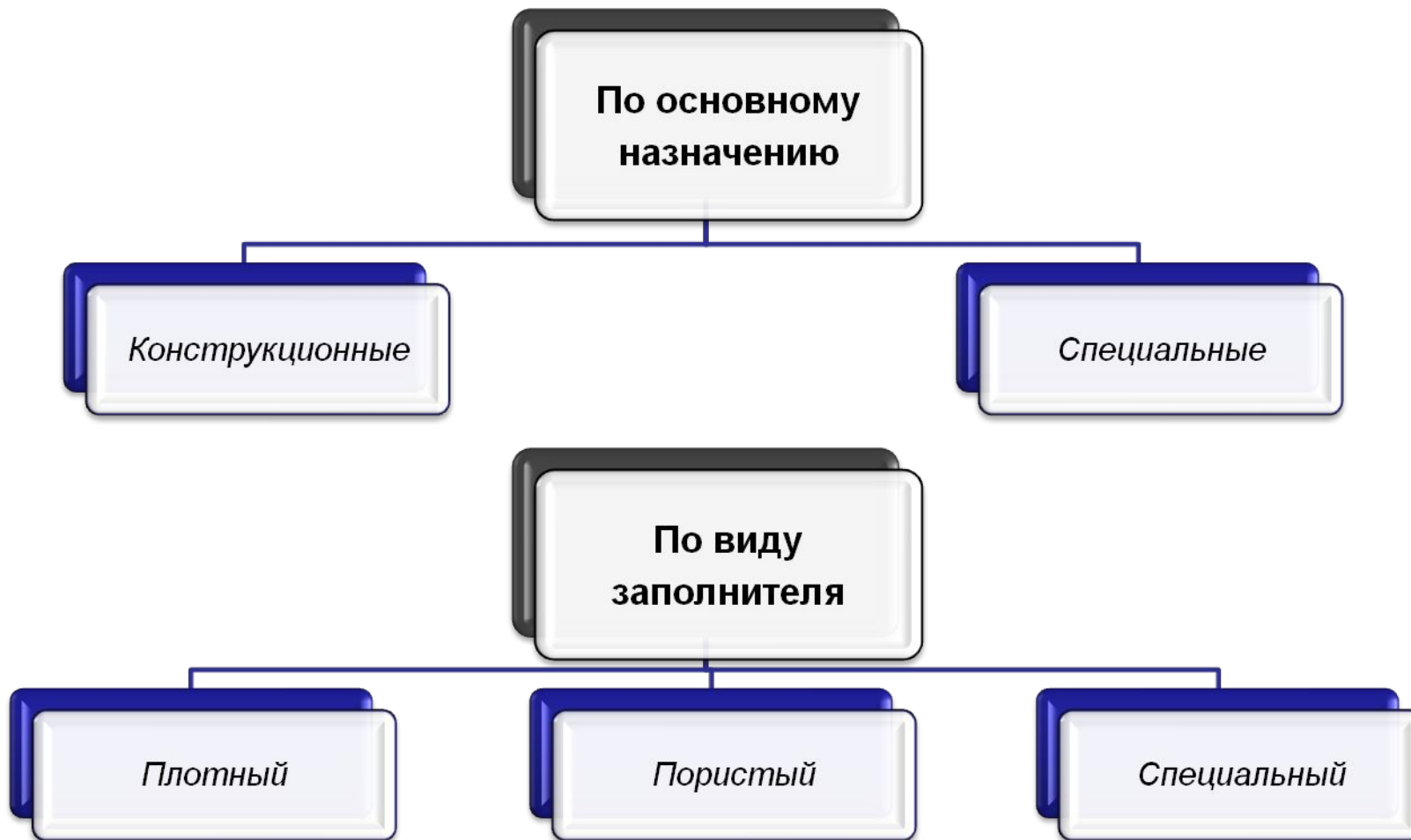
Строительные нормы устанавливают следующие **показатели качества бетона**:

- 1) класс бетона по прочности на осевое сжатие B – временное сопротивление сжатию бетонных кубов с размерами ребра 150 мм, испытанных в соответствии со стандартом через 28 суток при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ с учетом статистической изменчивости прочности ($B 7,5 \div B 100$);
- класс бетона по прочности на осевое растяжение ($B_t 0,8 \div B_t 3,2$);
- 1) марка по морозостойкости F – характеризуется числом выдерживаемых бетоном циклов попеременных замораживания и оттаивания в насыщенном водой состоянии ($F 50 \div F 500$);
- 2) марка по водонепроницаемости W – характеризуется предельным давлением воды (кг/см^2), при котором еще не наблюдается ее просачивание через испытываемый стандартный образец ($W 2 \div W 12$);
- 3) марка по средней плотности D – гарантированная собственная масса бетона (кг/м^3) : тяжелый бетон ($D 2200 \div D 2500$), легкий бетон ($D 800 \div D 2000$);
- марка по самоуплотнению S_p - значение предварительного напряжения в бетоне (МПа), создаваемого в результате его расширения при коэффициенте продольного армирования $\mu = 0,01$, контролируется на образцах - призмах размером $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$ ($S_p 0,6 \div S_p 4$).



2.1 Классификация бетона

Бетоны классифицируются по следующим принципам:



2.1 Классификация бетона

Бетоны классифицируются по следующим принципам:

По структуре

Плотной

Поризованной

Ячеистой

Крупнопористой

По виду
вяжущего

Цементные

Силикатные

Шлаковые

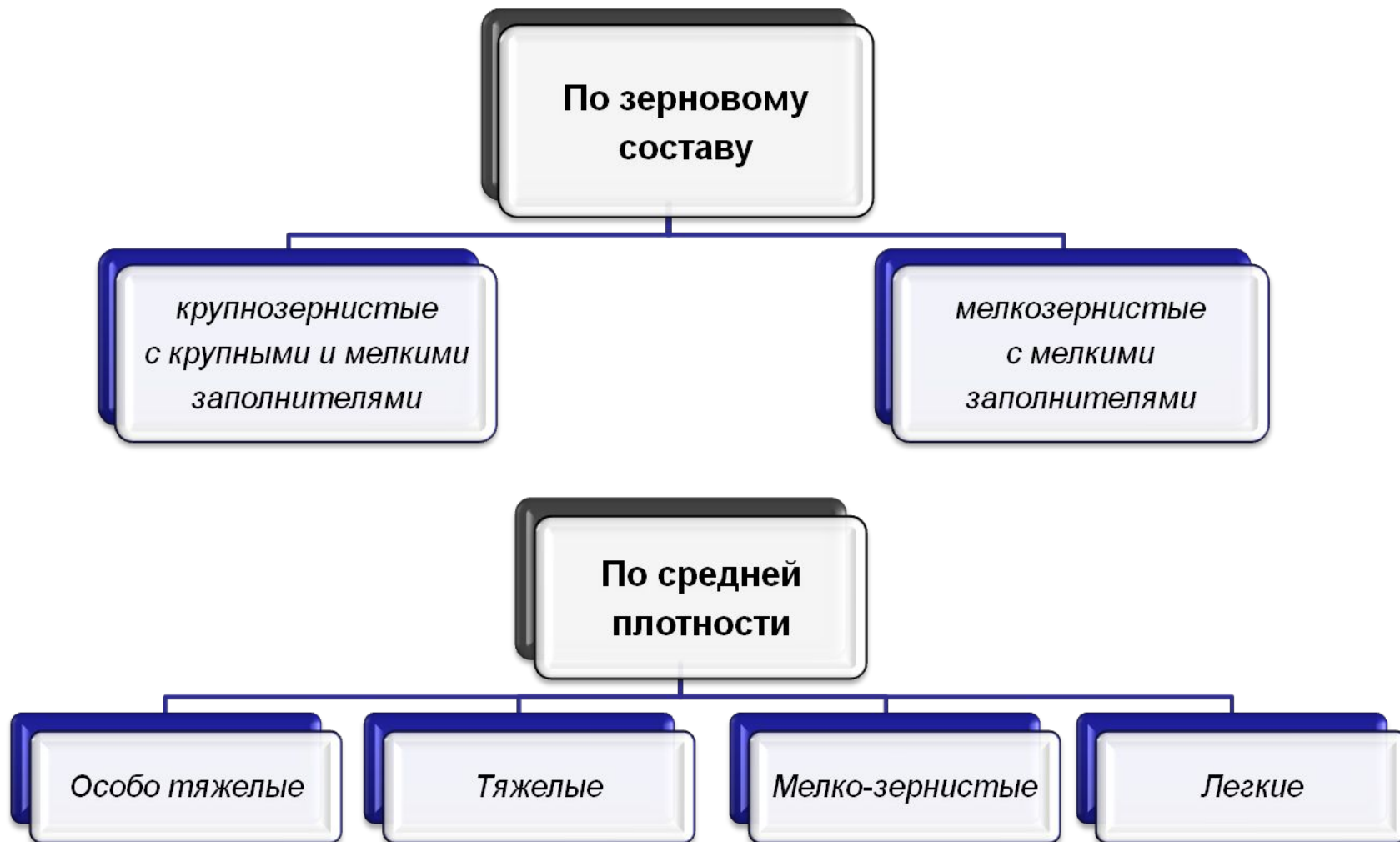
Другие

Полимер –
цементные



2.1 Классификация бетона

Бетоны классифицируются по следующим принципам:



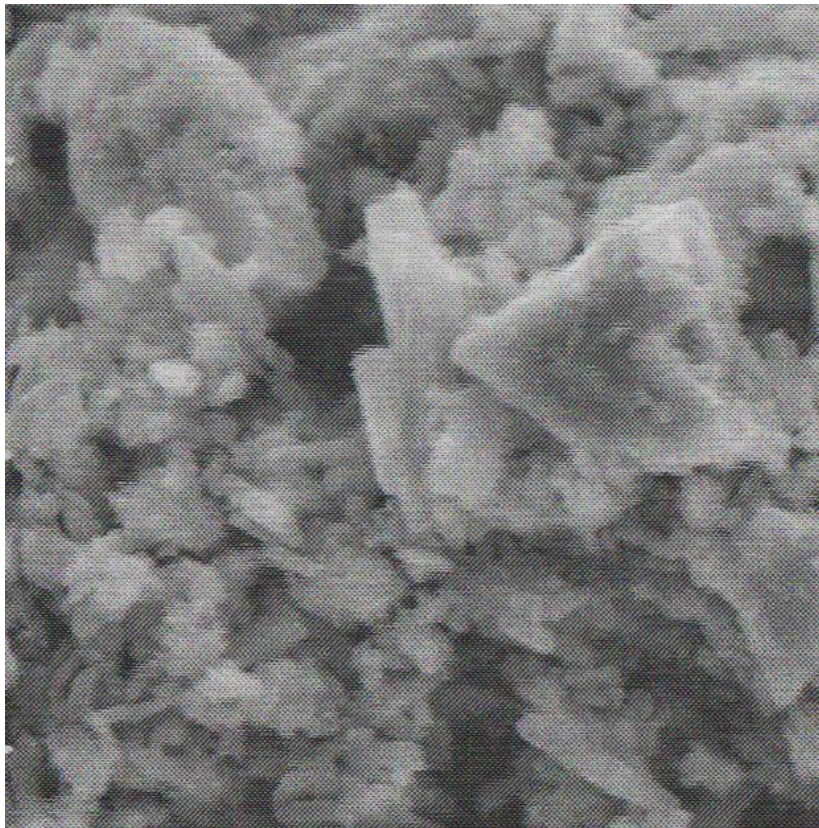
2.1 Классификация бетона

Бетоны классифицируются по следующим принципам:



2.2 Структура бетона

Физически бетон представляет собой капиллярно-пористый материал, в котором нарушена сплошность массы и присутствуют твердая, жидкая и газообразная фазы, а также вязкая масса – гель.



Цементный камень

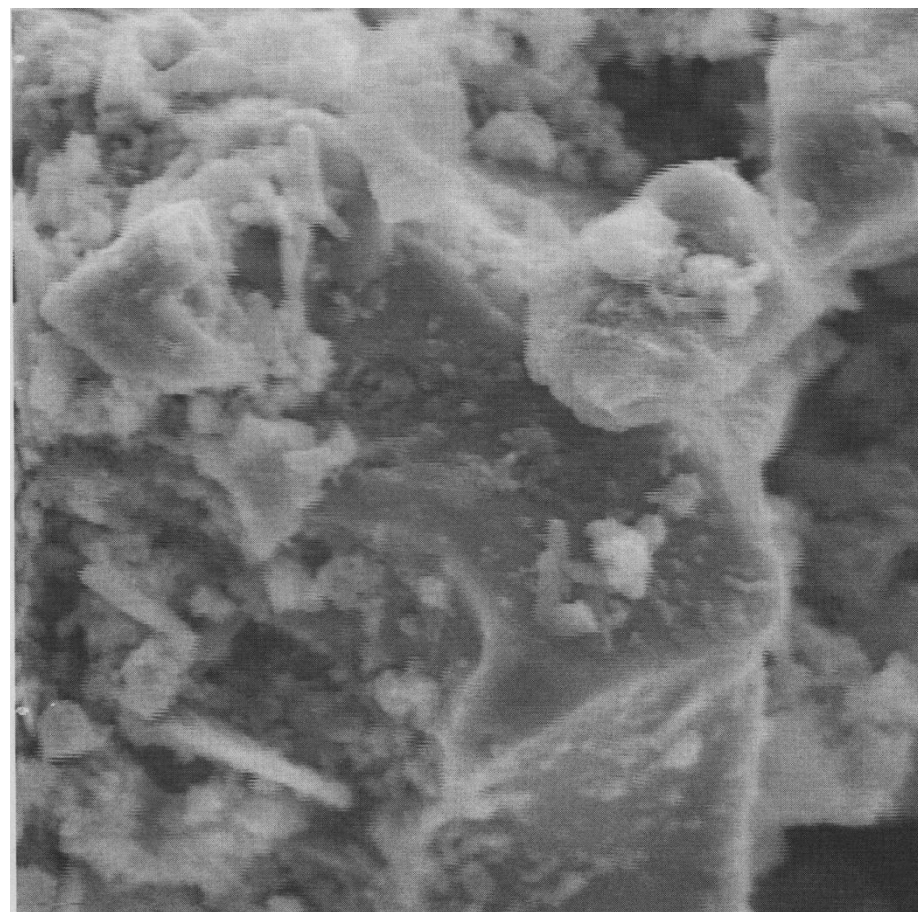
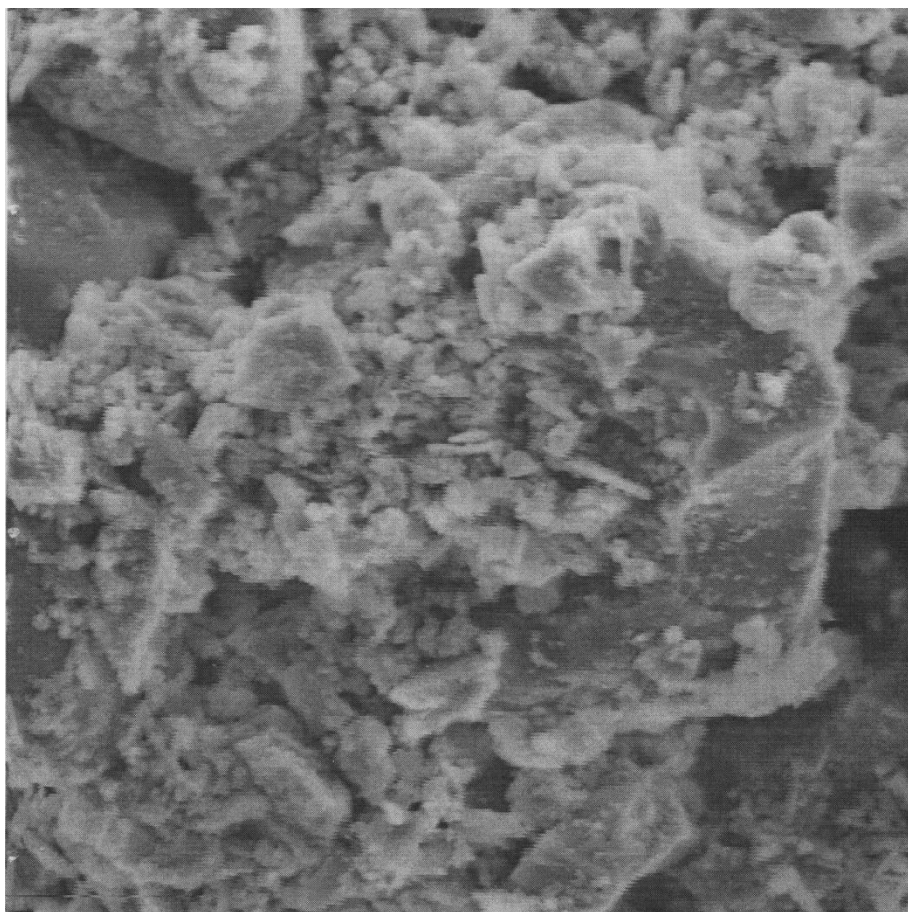
Структура бетона грубо неоднородна и зависит от многочисленных факторов:

- зернового состава крупных и мелких заполнителей;
- объемной концентрации цементного камня;
- водоцементного отношения (В/Ц);
- условий твердения;
- другое.

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

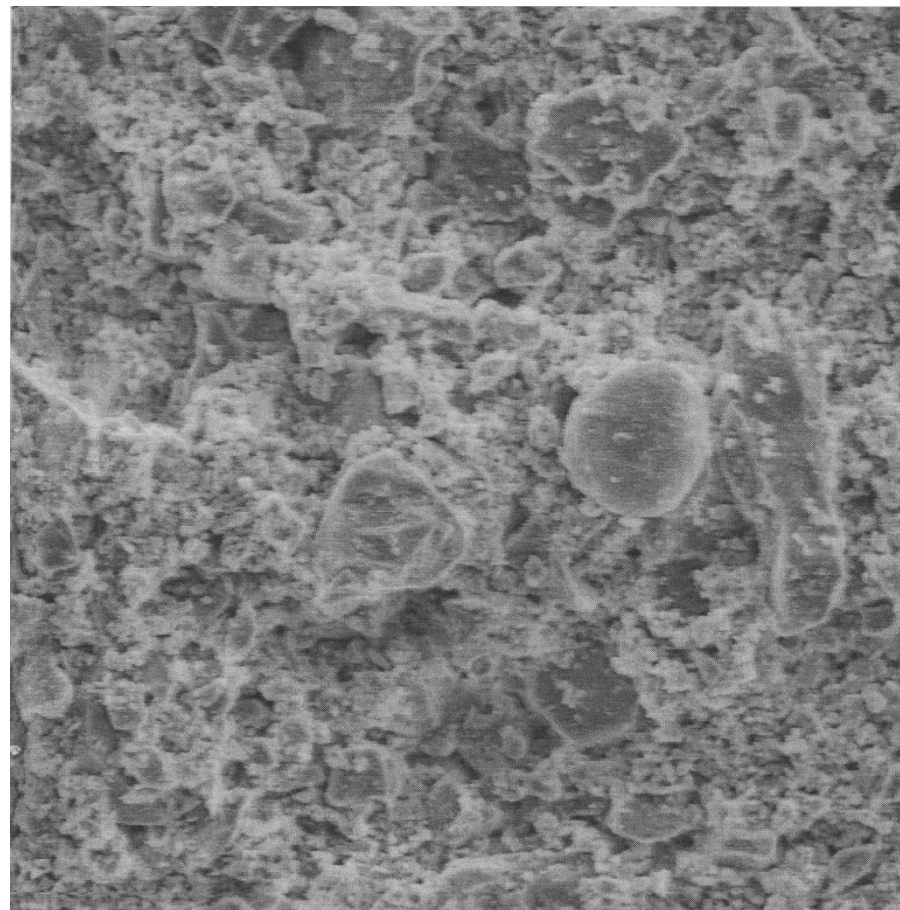
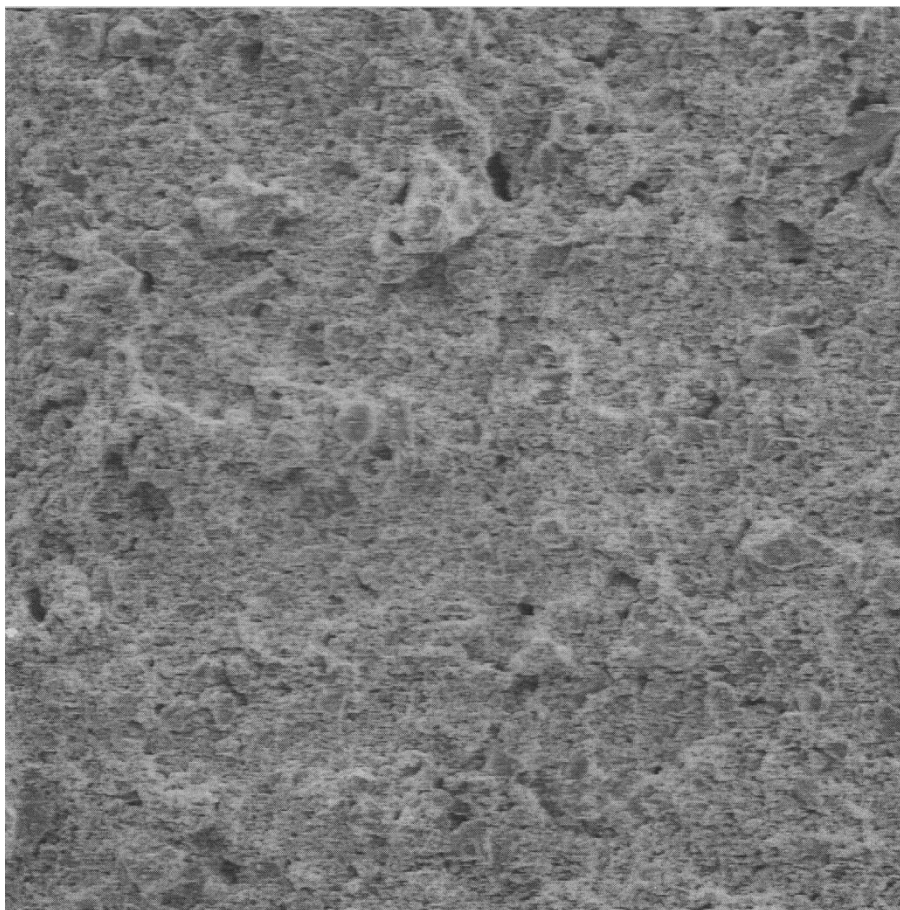


2.2 Структура бетона



Цементный камень под разным увеличением

2.2 Структура бетона



Цементный камень под разным увеличением



2.2 Структура бетона

Схема физико-химического процесса образования бетона

Затворение
водой смеси из
заполнителей и цемента



Химическая реакция соединения
минералов цемента с водой

Образование геля

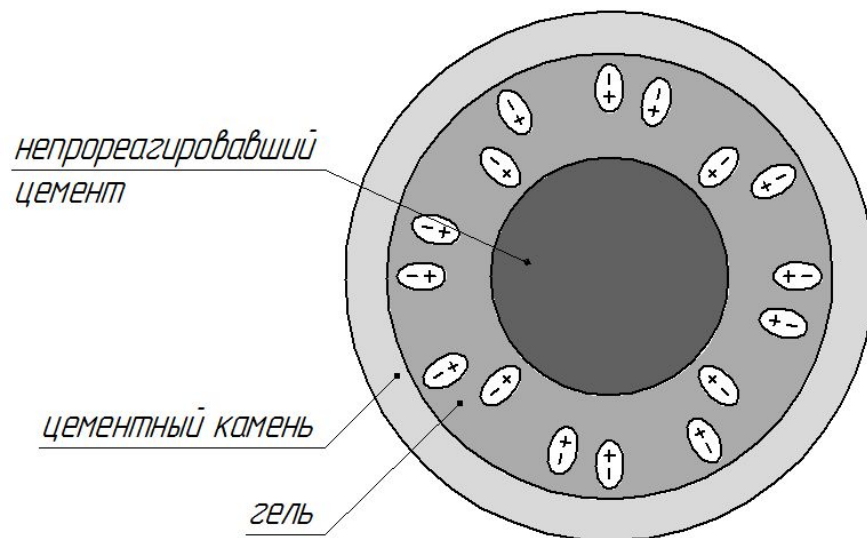


Процесс перемешивания
бетонной смеси

Гель обволакивает зерна заполнителей
и постепенно твердеет. Кристаллы
соединяются в кристаллические сростки.



Монолитный
твердый бетон



Длительные процессы, происходящие в бетоне, - изменение водного баланса, уменьшение объема твердеющего геля, рост упругих кристаллических сростков – наделяют бетон вязкоупругопластическими свойствами.



2.3. Прочность бетона

Под **прочностью твердого тела** понимают его способность сопротивляться воздействию внешних сил, не разрушаясь.

Прочность бетона зависит от ряда следующих факторов:

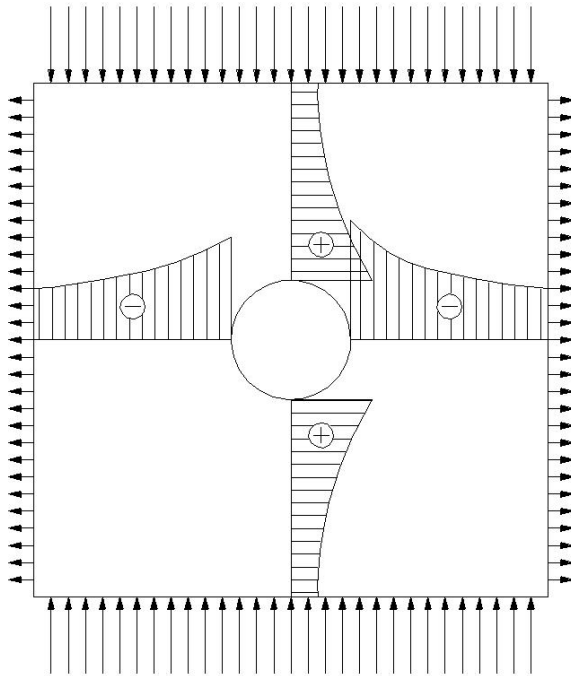
- структура бетона;
- марка и вид цемента;
- водоцементное отношение;
- вид и прочность крупного и мелкого заполнителя;
- технология изготовления;
- время и условия твердения;
- вид напряженного состояния;
- форма и размеры образцов;
- длительность и режим нагружения.

Определяющее влияние на прочность бетона оказывает взаимодействие твердой кристаллической части цементного камня с его пластичной гелевой частью. Со временем гелевая составляющая уменьшается, а кристаллическая –увеличивается.



2.3.1. Основы прочности

Так как бетон представляет собой неоднородное тело, любая даже самая простая внешняя нагрузка создает в нем сложное напряженное состояние.

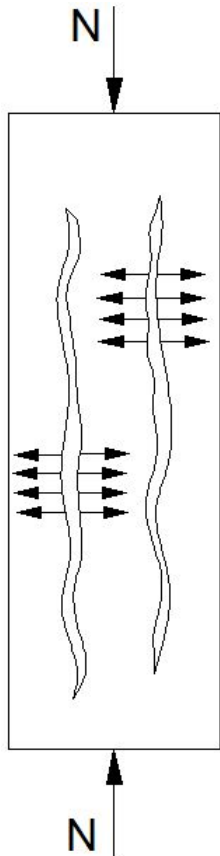


Напряженное состояние
в месте ослабления
бетона

В подвергнутом сжатию бетонном образце напряжения концентрируются на более жестких (обладающих большим модулем упругости) частицах, в результате чего по поверхностям соединения частиц возникают усилия, стремящиеся нарушить связь между ними. В то же время, в местах ослаблений бетона порами происходит концентрация напряжений. При этом растягивающие напряжения действуют по площадкам, параллельным сжимающей силе. Поскольку в бетоне содержится большое количество пор, напряжения у одного отверстия накладываются на напряжения у рядом расположенного отверстия.



2.3.1. Основы прочности



В результате в бетонном образце, подвергнутом осевому сжатию, возникают как продольные сжимающие, так и поперечные растягивающие напряжения – **вторичное поле напряжений**.

Так как сопротивление бетона растяжению на порядок ниже, чем сжатию, а прочность сцепления цементного камня с заполнителями может быть и того меньше, вторичные растягивающие напряжения в сжатом бетоне, еще далеком от исчерпания прочности, достигают местами предельных значений и приводят к образованию микротрещин. С ростом нагрузки микротрещины умножаются, объединяются в более или менее протяженные макротрещины. Затем эти трещины получают значительное раскрытие, и образец разделяется на части.

Макротрещины в бетонном образце

Таким образом, про бетонный образец, подвергнутый осевому сжатию, можно сказать, что, хотя сам образец разрушается от сжатия, материал образца разрушается от растяжения.



2.3.2. Нарастание прочности бетона во времени

Степень увеличения прочности бетона связана с температурно-влажностными условиями окружающей среды и составом бетона. Наиболее быстрый рост прочности наблюдается в начальный период.

Рост прочности бетона обусловлен уплотнением гелевой структурной составляющей цементного камня и ростом кристаллических образований последнего.

Например, нарастание прочности бетона низкой прочности (до В15) на портландцементе при положительной температуре твердения (15°C) и влажной среде может быть выражено эмпирической зависимостью

$$R_b(t) = \frac{R_b \lg t}{\lg 28} = 0,71 \lg t, \quad (2.1)$$

где $R_b(t)$ - временное сопротивление сжатию бетонного куба в возрасте t суток;

R_b - то же, в возрасте 28 суток.

Эта формула дает результат достаточно близкий к экспериментальным данным при $t \geq 7$ суток.

Для бетонов более высокой прочности могут быть рассмотрены другие зависимости, предложенные Г.А. Гениевым, Е.Н. Щербаковым, С.М. Скоробогатовым, Т.М. Пецольдом и другими.



2.3.2. Нарастание прочности бетона во времени

В Евронормах принята следующая зависимость:

$$R_b(t) = \beta_{cc}(t) \cdot R_b; \quad (2.2)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}, \quad (2.3)$$

где $R_b(t)$ - средняя прочность при сжатии в возрасте t суток;

R_b - средняя прочность в возрасте 28 суток;

β_{cc} - коэффициент, зависящий от возраста бетона;

t - возраст бетона в сутках;

s - коэффициент, зависящий от используемого типа цемента:

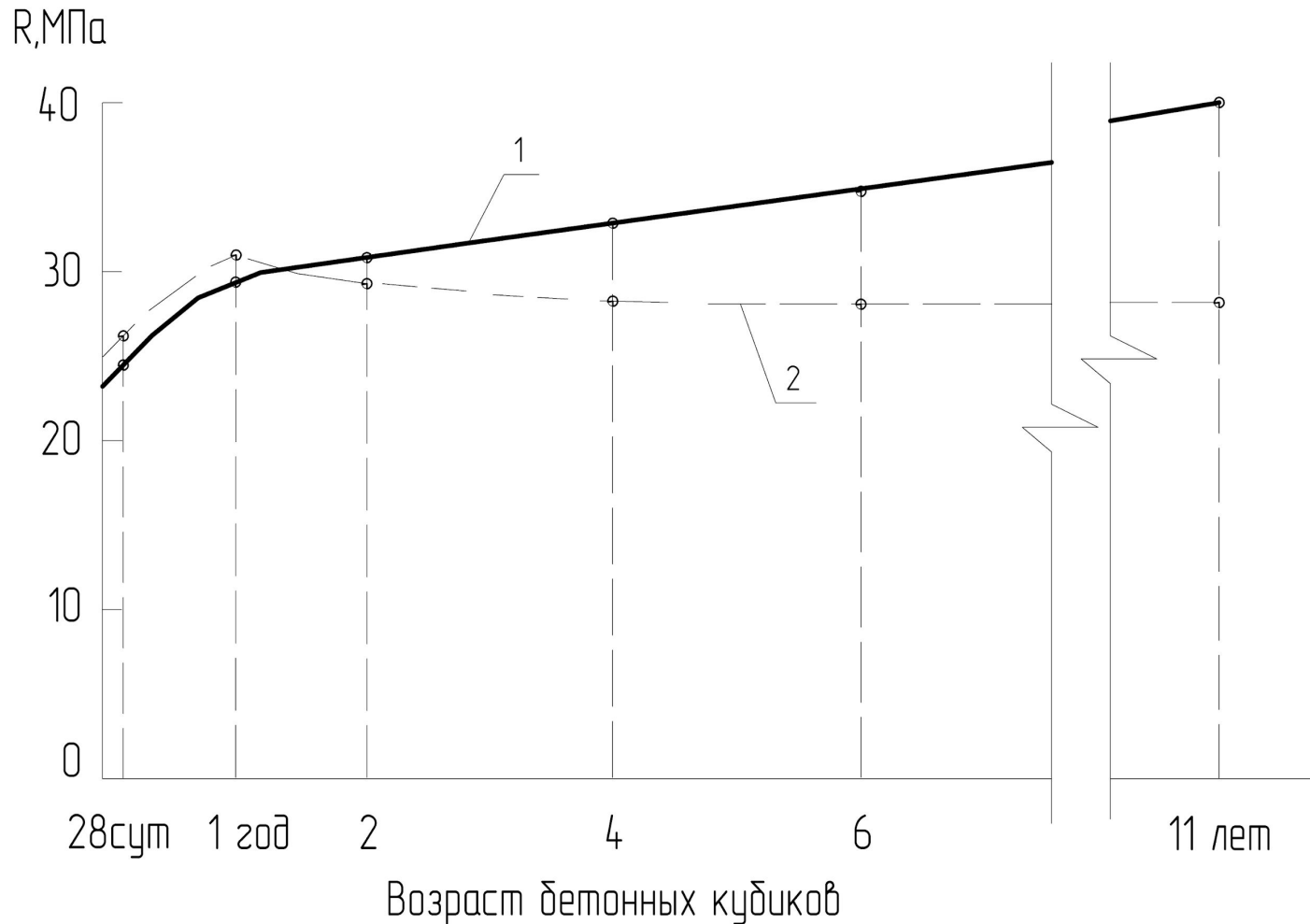
- 0,20 – для цементов высоких классов прочности (~М600);

- 0,25 – для цементов средних классов прочности (~М400, М500);

- 0,38 – для цементов низких классов прочности (~М300).



2.3.2. Нарастание прочности бетона во времени



1 – при хранении во влажной среде;

2 – то же в сухой среде (относительная влажность менее 40%)



2.3.3. Прочность бетона при центральном сжатии

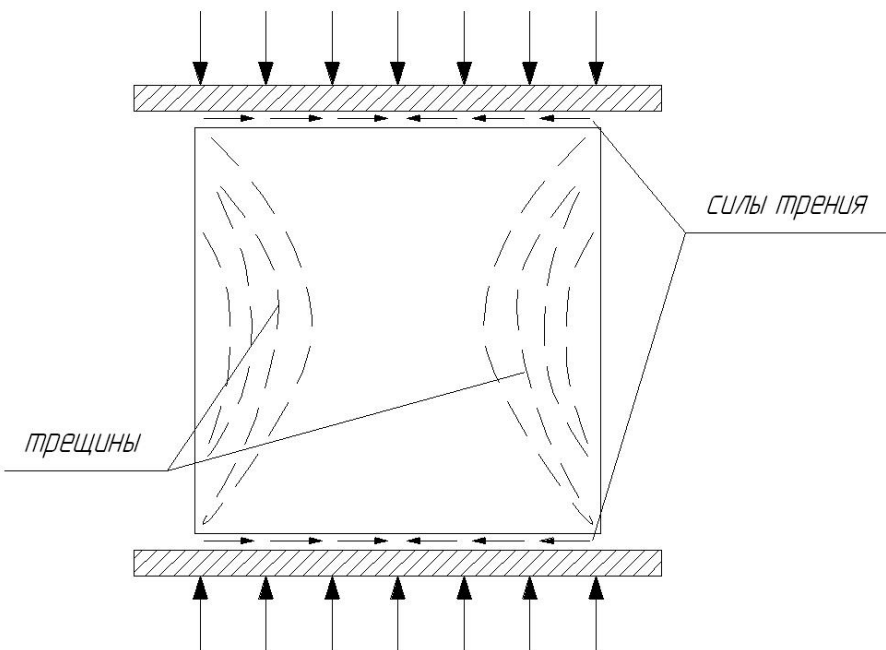


Схема разрушения бетонного куба при наличии сил трения по опорным плоскостям

Бетонный кубик имеет достаточно однородное строение и правильную геометрическую форму. Разрушаясь под действием равномерно распределенной нагрузки, он приобретает форму двух усеченных пирамид, сложенных своими малыми основаниями. Наклон трещин разрыва обусловлен значительным влиянием сил трения, которые развиваются между подушками прессы и торцевыми поверхностями образца.

Если устранить влияние сил трения поверхностей касания, то разрушение носит иной характер.



2.3.3. Прочность бетона при центральном сжатии

Кубы разрушаются вследствие разрыва бетона в поперечном направлении.

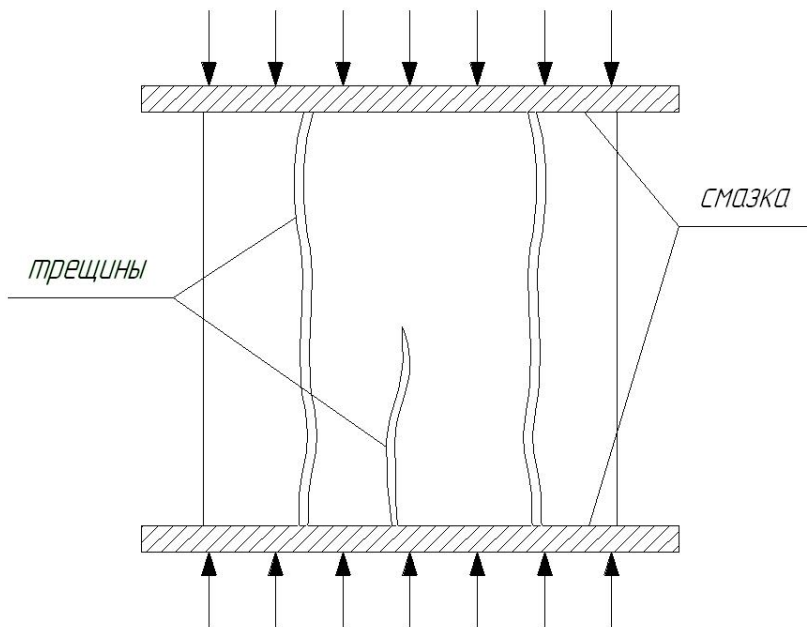


Схема разрушения бетонного куба при отсутствии трения

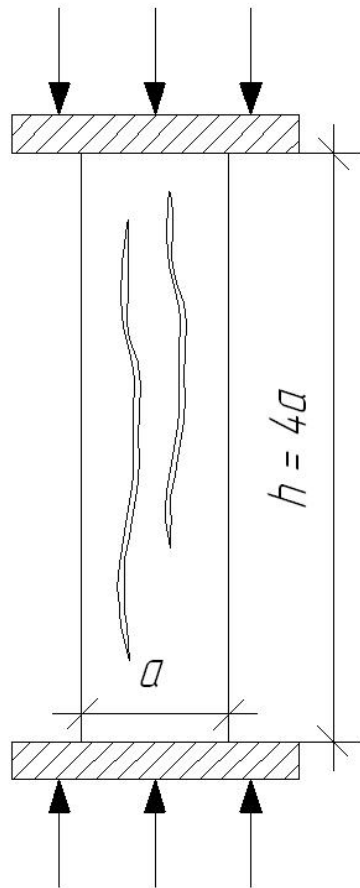
Поперечные деформации проявляются свободно, трещины разрыва становятся вертикальными, параллельными действию сжимающей силы, а временное сопротивление уменьшается. Разрушение в этом случае происходит при гораздо меньшей (до 40%) сжимающей нагрузке.

Прочность кубиков из бетона одного и того же состава зависит от размеров образца и уменьшается с увеличением размеров, в следствие ряда причин:

- удерживающее влияние сил трения по мере удаления от торцевых граней куба уменьшается;
- снижения скорости набора прочности на воздухе крупных образцов;
- повышения вероятности наличия внутренних и внешних дефектов.



2.3.3. Прочность бетона при центральном сжатии

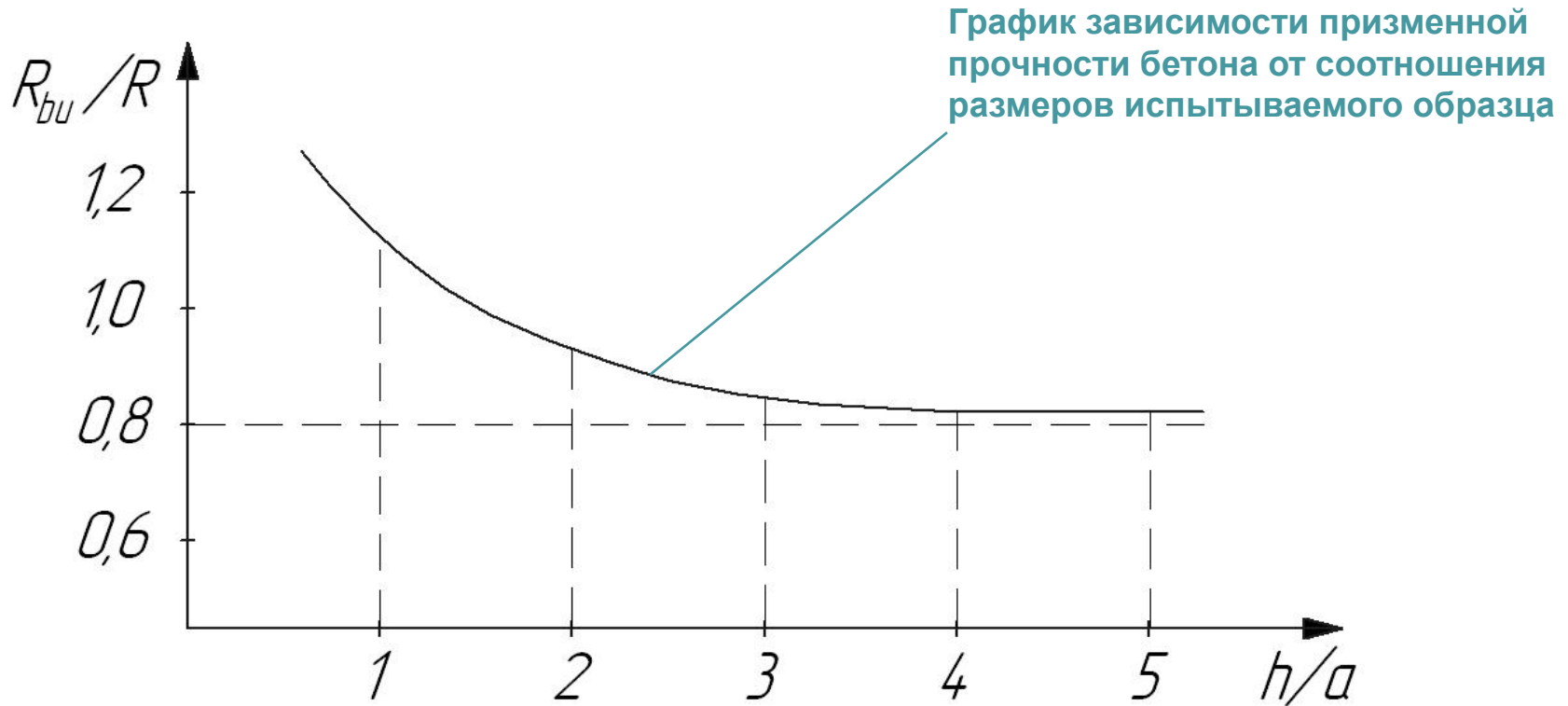


Призменная прочность R_{bu} – временное сопротивление осевому сжатию бетонных призм. Зависимость между кубиковой и призменной прочностью колеблется от $R_{bu} \approx 0,78 \cdot R$ (для бетонов классов В30 и ниже) до $R_{bu} \approx 0,83 \cdot R$ (для бетонов высоких классов). Опыты с бетонными образцами, имеющими форму призмы с квадратным основанием a и высотой h , показали, что с увеличением отношения h/a прочность при центральном сжатии уменьшается и при $h/a \geq 4$ становится почти стабильной и равной, в зависимости от класса бетона, $(0,7-0,8) \cdot R$, (где R – куб. прочность). Гибкость бетонного образца оказывает влияние при испытаниях только при $h/a \geq 8$.

В соответствии с ГОСТ 10180 прочность бетона при центральном сжатии R определяется путем испытания до разрушения бетонных образцов-призм с отношением высоты к стороне основания равно 4.



2.3.3. Прочность бетона при центральном сжатии



Величину R_{bu} используют при расчете прочности сжатых бетонов и железобетонных конструкций (колонн, стоек, сжатых элементов ферм и т. д.), изгибаемых конструкций (плит, балок) и конструкций, работающих на некоторые другие виды воздействий (например, кручение, косоу изгиб и т. д.).



2.3.4. Прочность бетона при растяжении

Прочность бетона при растяжении зависит от прочности на растяжение цементного камня и его сцепления с зернами заполнителя.

Истинная прочность бетона при растяжении определяется его сопротивлением осевому растяжению. Предел прочности при осевом растяжении R_{btu} сравнительно невысок и составляет $(0,05-0,1) \cdot R$. Столь невысокая прочность обуславливается неоднородностью структуры и чрезмерно ранним нарушением сплошности бетона, что способствует концентрации напряжения, особенно при действии растягивающих усилий.

Повышение прочности бетона на растяжение может быть достигнуто:

- увеличением расхода цемента;
- уменьшением В/Ц;
- применением щебня с шероховатой поверхностью.

Величину R_{btu} можно определить по эмпирической формуле Фере:

$$R_{btu} = 0,232 \cdot \sqrt[3]{R^2}. \quad (2.4)$$

Вследствие неоднородности структуры бетона эта формула не всегда дает правильные значения. Более точно их определяют испытаниями: на разрыв – образцов в виде восьмерки, на раскалывание – образцов в виде цилиндров, на изгиб – бетонных балок.

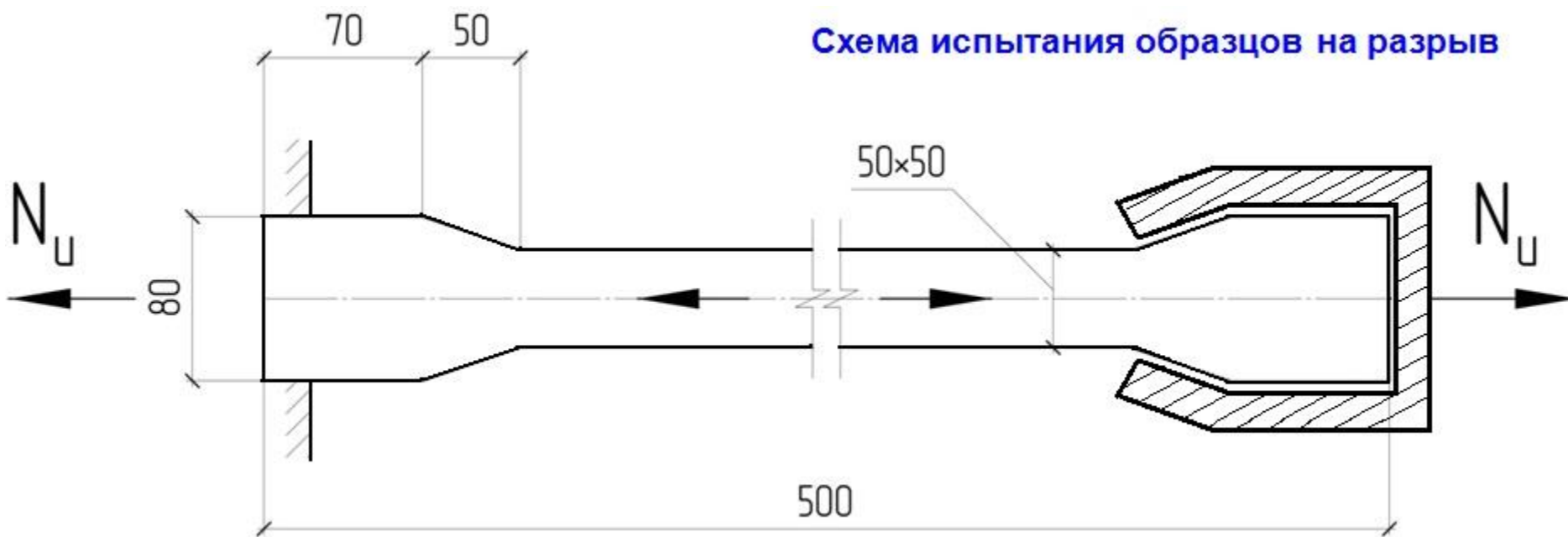


2.3.4. Прочность бетона при растяжении

Прочность бетона при осевом растяжении устанавливают испытанием на разрыв образцов с рабочим участком в виде призмы достаточной длины, чтобы обеспечить равномерное распределение внутренних усилий в его средней части. Концевые участки таких образцов расширены для крепления в захватах. Нагрузка подается равномерно со скоростью $\sim 0,06$ МПа/с.

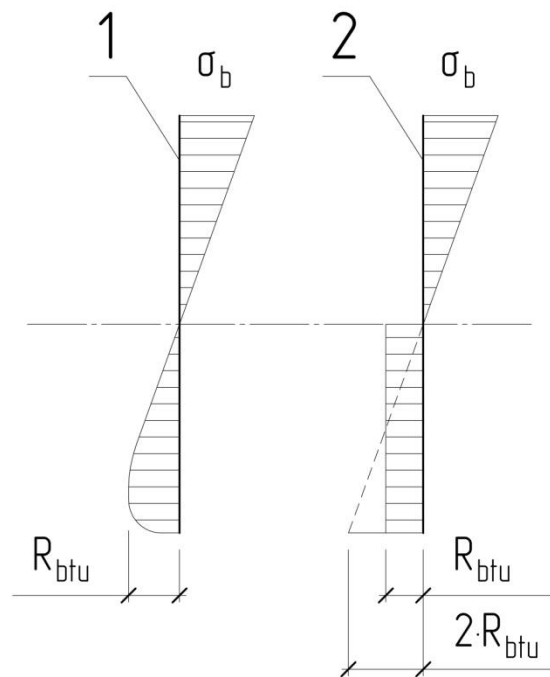
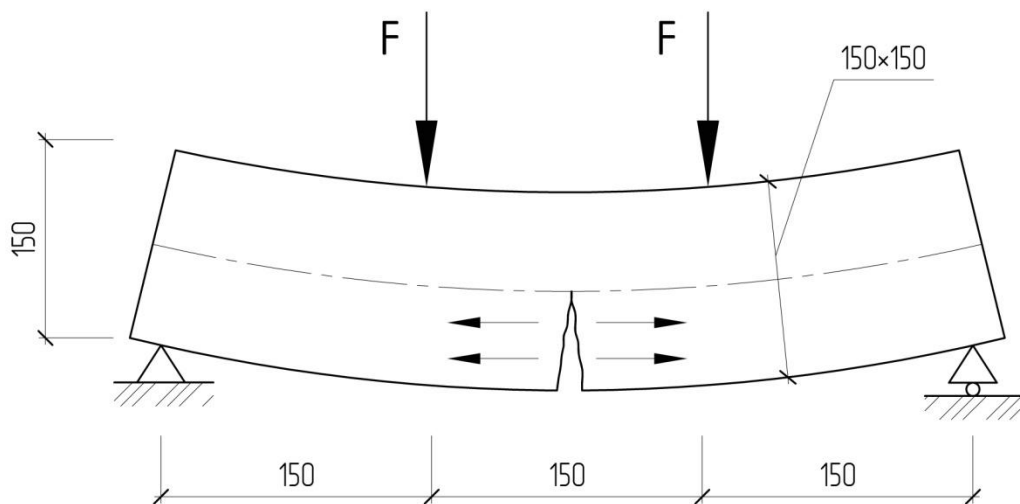
В этом случае $R_{bt} = N_u / A_b$, (2.5)

где N_u – разрушающая сила; A_b – площадь поперечного сечения образца.



2.3.5. Испытание бетонного образца на изгиб

Основной недостаток испытания на осевое растяжение – трудности, возникающие при центрировании образца, и связанный с этим большой разброс данных. В связи с этим чаще всего сопротивление бетона растяжению оценивается путем испытания на изгиб бетонных балочек с сечением 15·15 см.



1 - фактическое распределение напряжений по высоте сечения;

2 - расчетное



2.3.5. Испытание бетонного образца на изгиб

Разрушение в этом случае наступает вследствие исчерпания сопротивления растянутой зоны, причем эпюра напряжений в ней из-за неупругих свойств бетона имеет криволинейное очертание. При таком испытании для определения величины R_{btu} используется **упругопластичный момент сопротивления**:

$$W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5}, \quad (2.6)$$

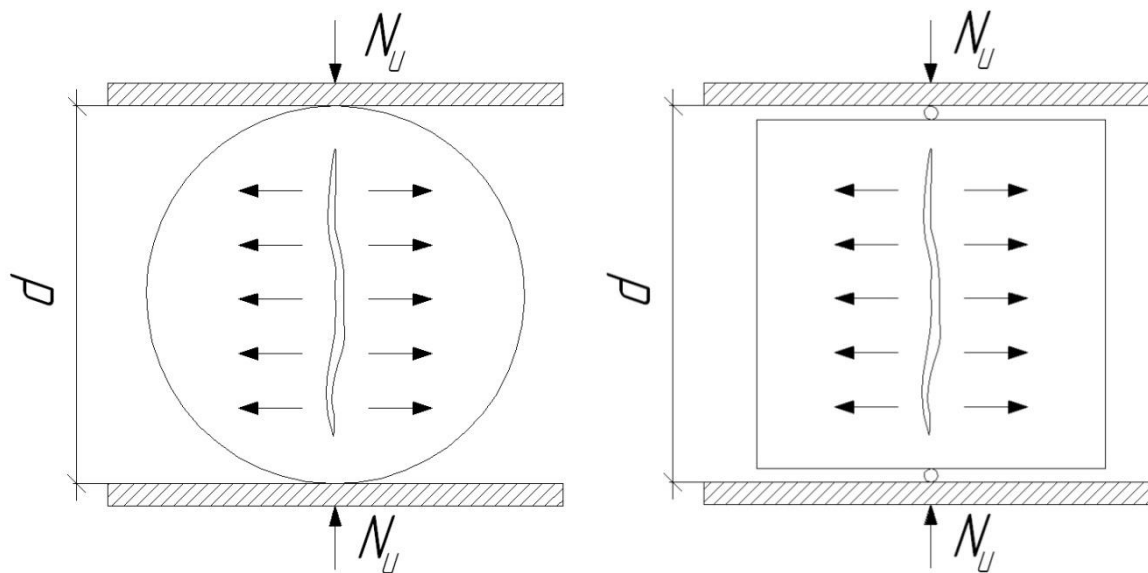
отличающийся от «упругого» W_{el} множителем $W_{pl} = \gamma \cdot W_{el}$;

$$\gamma = \frac{6}{3,5} \approx 1,3 - \text{ для прямоугольного сечения.}$$

Множитель, учитывающий криволинейный характер эпюры напряжений в бетоне растянутой зоны сечения вследствие развития неупругих деформаций.



2.3.6. Испытания бетонного образца на раскалывание



Схемы испытаний
бетонных образцов
на раскалывание

Опытное значение прочности бетона, полученное по результатам таких испытаний, определяется по формуле:

$$R_{btu} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N_u}{d \cdot l}. \quad (2.7)$$

Характеристика эта сугубо условная, так как не учитывает пластических деформаций, развивающихся в цилиндре перед его разрушением. По этой причине прочность бетона, получаемая по результатам испытаний на раскалывание, оказывается заметно большей, чем при испытаниях на изгиб и на осевое растяжение.



2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

Неоднородность структуры бетона приводит к тому, что при испытании образцов, приготовленных из одной и той же бетонной смеси, получаются неодинаковые показатели прочности. Чтобы оценить изменчивость свойств и обеспечить ее гарантированное значение вплоть до последнего времени в качестве эталона прочности бетона была принята марка бетона.

С 1984 г. марка бетона, как показатель его качества по прочности, заменена классом. Разница между классом и маркой состоит в обеспеченности принятой величины сопротивления: для марки эта обеспеченность составляла 0,5 (т. е. бралась среднестатистическая величина), для класса – 0,95.

Классом бетона по прочности на осевое сжатие В (МПа)

называется временное сопротивление сжатию бетонных кубов с размером ребра 150 мм, испытанных в соответствии со стандартом через 28 суток хранения при температуре $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ с учетом статистической изменчивости прочности.

Чтобы обеспечить гарантированное для данного класса значение прочности, прибегают к методам теории вероятностей, пользуясь кривой распределения прочности.

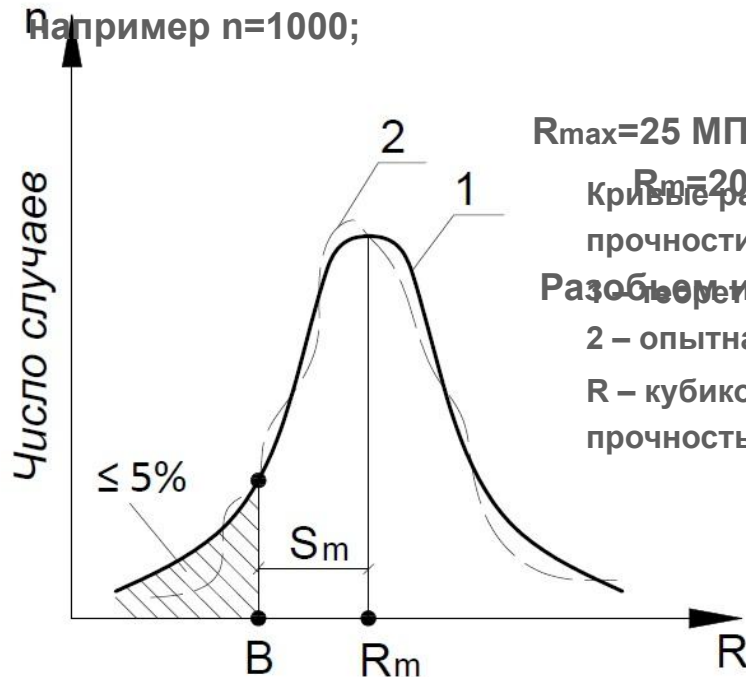


2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

Допустим, что опыт состоял из n повторных измерений бетонных кубиков и в результате получили значения R_1, \dots, R_n .

Объем выборки достаточно большой,

Например $n=1000$;



$R_{\max}=25$ МПа, $R_{\min}=15$ МПа;

$R_m=20$ МПа, среднее значение;
Кривые распределения прочности:

Разброс интервала R_1, \dots, R_n на участки:

2 – опытная.

R – кубиковая прочность

$$\Delta R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{S} = \frac{25 - 15}{10} = 1 \text{ МПа},$$

где S — число участков разбиения.

Для установления закона распределения случайной величины используют Критерий Согласия Пирсона. По выборке строят эмпирическое распределение исследуемой случайной величины и сравнивают его с теоретическим. На основе данного критерия установлено, что **прочность бетона распределяется по нормальному закону**.

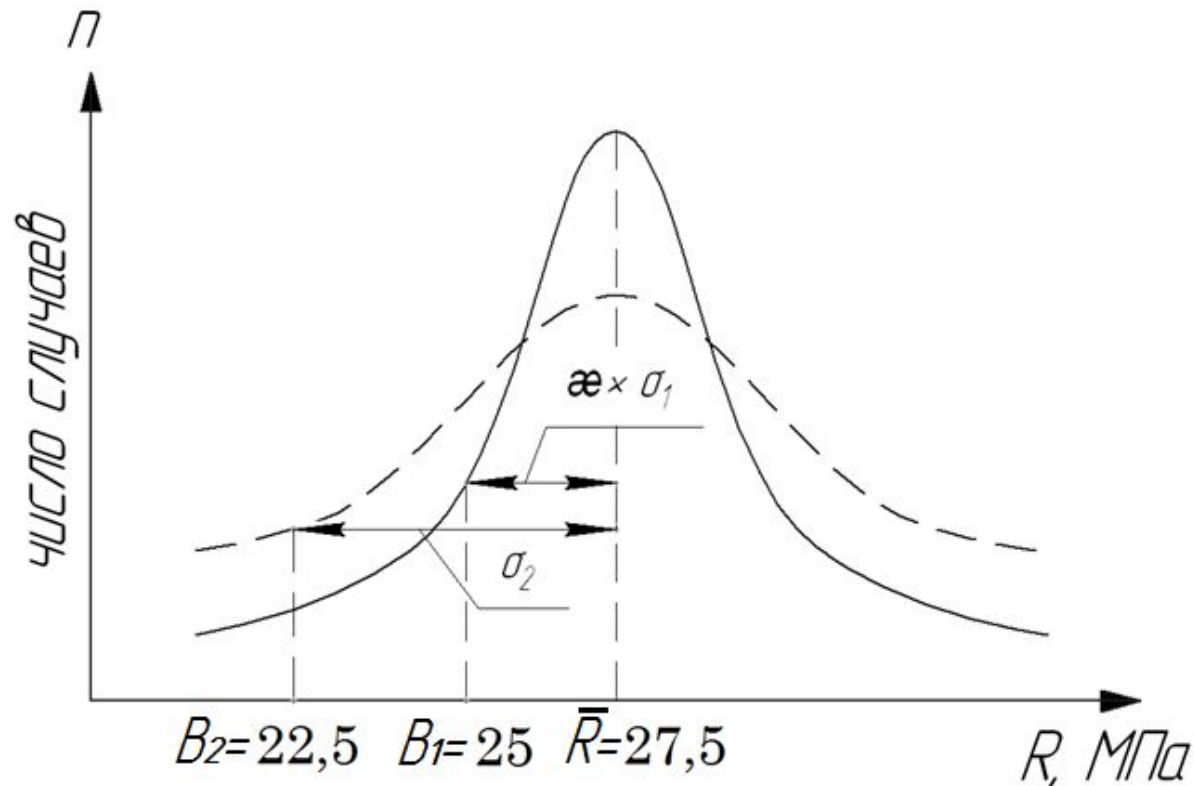


2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

Гарантированное сопротивление $B = \bar{R} - \alpha \sigma$, где α - квантиль.

Для определения гарантированного сопротивления с обеспеченностью 0,95 (95%) значение квантиля $\alpha = 1,64$;

$\sigma_1 = 2,5$ МПа, $\sigma_2 = 5$ МПа.



2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

Нормальное распределение случайной величины- это распределение, для которого плотность вероятностей определяется зависимостью:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.8)$$

где a, σ -параметры распределения.

Для нормального распределения:

- Математическое ожидание-мера среднего значения случайно величины (R_m).

- Дисперсия-мера разброса случайной величины: $\sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i(x_i - \bar{x})^2;$ (2.9)

- Среднеквадратичное отклонение : $\sigma = \sqrt{\sigma^2}.$ (2.10)

Например: Пусть $R_1=22,5$ МПа, $R_2=25$ МПа; $R_3=27,5$ МПа,

Тогда

$$R_m = \frac{22,5 \cdot 1 + 25 \cdot 1 + 27,5 \cdot 1}{3} = 25 \text{ МПа}; \quad (2.11)$$

$$S = \sigma^2 = \frac{\sum \Delta_i^2}{n-1} = \frac{(22,5-25)^2 + (25-25)^2 + (27,5-25)^2}{3-1} = 6,25; \quad (2.12)$$

$$\sigma = \sqrt{S^2} = \sqrt{6,25} = 2,5; \quad (2.13)$$

$$V_m = \frac{\sigma}{R} = \frac{2,5}{25} = 0,1 \quad \text{- коэффициент вариации.} \quad (2.14)$$



2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

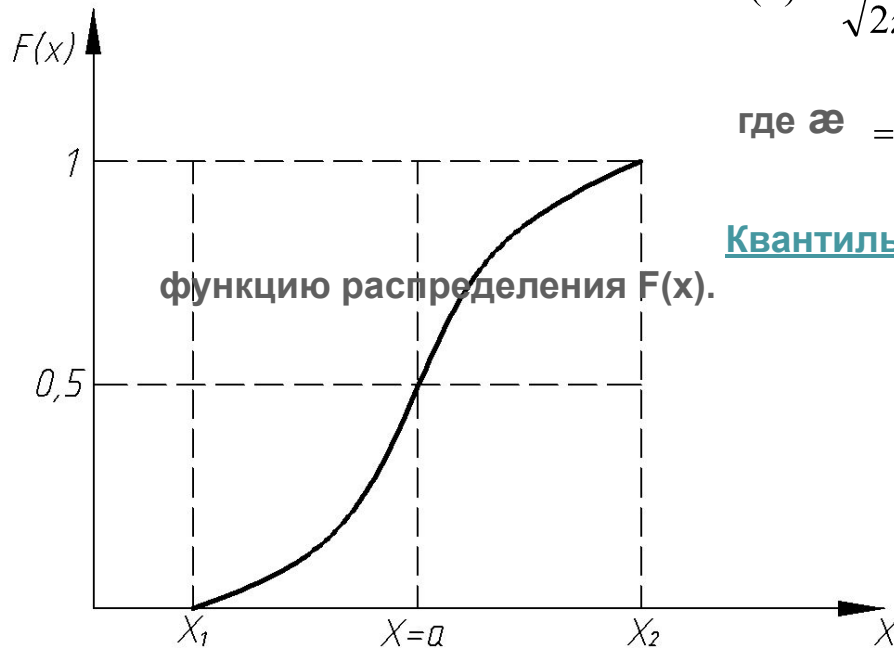
Коэффициент вариации - это величина, численно равная отношению среднеквадратичного отклонения случайной величины к её математическому ожиданию.

Чем совершеннее производство и технология производства бетонной смеси, тем меньше значение V_m и тем экономичнее производство.

Функция распределения нормального закона определяется интегралом от плотности вероятности и представляется специальной функцией Лапласа:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = F(x_2) - F(x_1), \quad (2.15)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{x-a}{\sigma} \text{ - квантиль.} \quad (2.16)$$



2.3.7. Класс бетона, контрольная прочность

Вероятность попадания случайной величины в интервал от x_1 до x_2 определяется выражением:

$$P(x_1 \leq \bar{x} \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} dx = F(x_2) - F(x_1). \quad (2.17)$$

При $x_1 = R_n$; $a = \bar{R}$; $x_2 = +\infty$, $P(R_n \leq \bar{R} \leq \infty) = 0,5 - F(x_1)$, $x_1 = \frac{R_n - \bar{R}}{\sigma}$.

Т.к. $F(-x_1) = -F(x_1)$, $P(R_n \leq \bar{R} \leq \infty) = 0,5 + F\left(\frac{\bar{R} - R_n}{\sigma}\right)$.

Примем $P(R_n \leq \bar{R} \leq \infty) = 0,95$.

Тогда $0,95 = 0,5 + F\left(\frac{\bar{R} - R_n}{\sigma}\right)$, $F\left(\frac{\bar{R} - R_n}{\sigma}\right) = 0,45$.

По таблицам специальной литературы находим значение квантиля, соответствующее

$$F = 0,45 \quad x_1 = 1,64, \quad \frac{\bar{R} - R_n}{\sigma} = 1,64,$$

$$R_n = \bar{R} \cdot (1 - 1,64 \cdot v) \quad (2.18)$$

- Прочность, гарантированная заводом-изготовителем
в зависимости от уровня технологии производства
(фактического значения коэффициента вариации)
и среднего значения прочности бетона

Пример:

$$\bar{R} = 25 \text{ МПа}; \quad v = 0,1; \quad R_n = 25 \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,1) = 20,9 \Rightarrow B20.$$

$$\bar{R} = 25 \text{ МПа}; \quad v = 0,135; \quad R_n = 25 \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 19,46 \Rightarrow B17,5.$$



2.3.8. Влияние на прочность бетона длительных и многократно повторных нагрузок

Одним из важнейших показателей прочности бетона следует считать его длительное сопротивление (длительная прочность), определяемое из опыта с длительным нагружением, в процессе которого бетонный образец может разрушиться при напряжениях, меньших, чем его предельное сопротивление.

Пределом длительного сопротивления бетона называют наибольшие напряжения σ_{bl} , которые он может выдержать неограниченно долгое время без разрушения (для строительных конструкций это десятки лет и более).

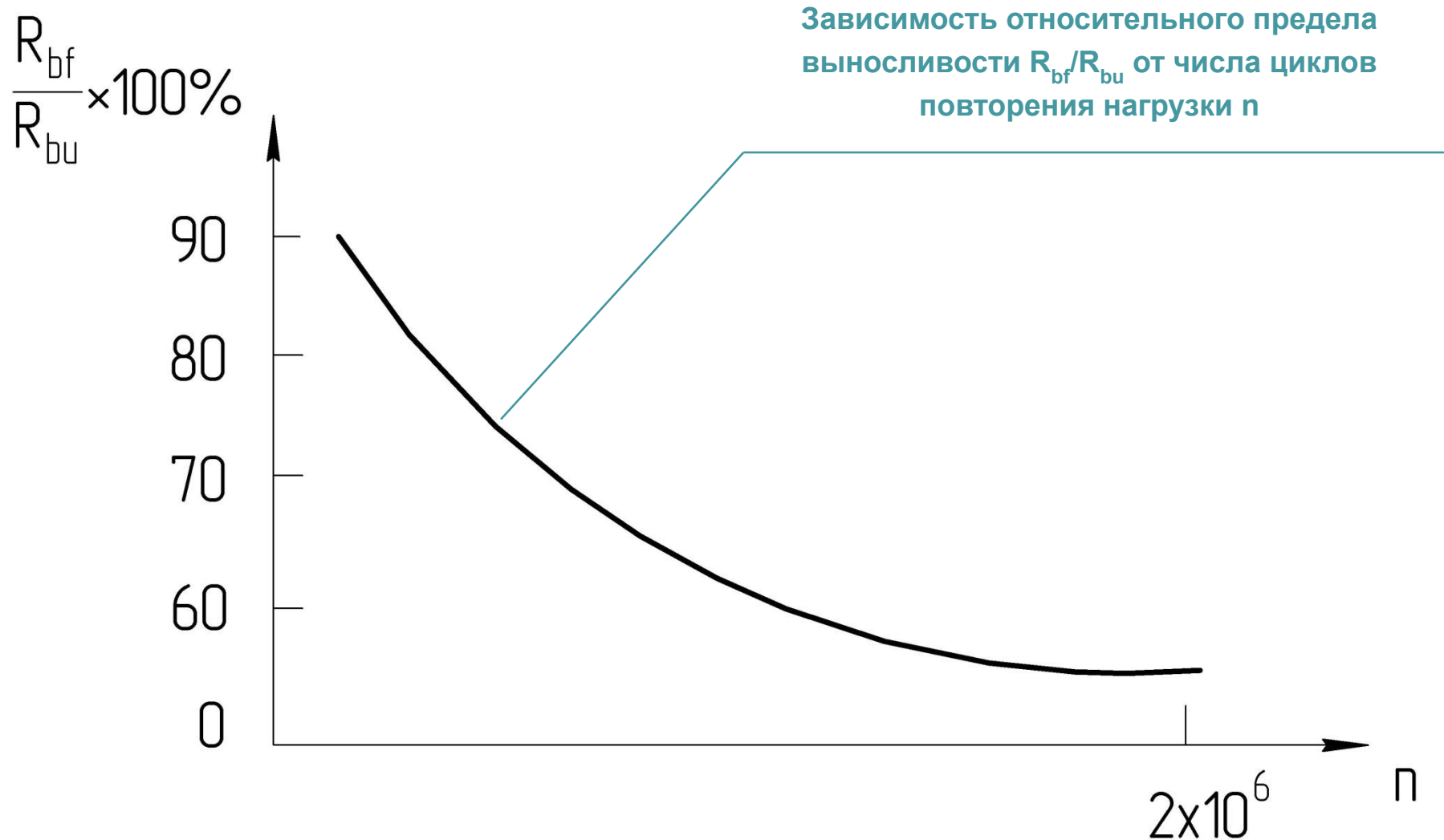
На основании опытов принято считать, что статические напряжения, величина которых меньше, примерно $R_{bl} \approx (0,8..0,9) \cdot R_b$, не вызывают разрушения образца при любой длительности нагружения, так как развитие возникающих в бетоне микроразрушений со временем прекращается. Если же образец нагружен большими напряжениями, то появившиеся нарушения структуры будут развиваться, и, в зависимости от уровня напряжений, раньше или позже он разрушится. Таким образом, предел длительной прочности определяется, по существу характером структурных изменений, вызванных длительно действующей нагрузкой.

Предел прочности бетона при действии многократно повторных нагрузок называется пределом выносливости. Практически за предел выносливости бетона принимают максимальное напряжение, которое образец выдерживает при количестве циклов повторных нагружений $\sim 2 \cdot 10^6$ (база испытаний).

Зависимость относительного предела выносливости (R_{bf}/R_{bu}) от числа циклов повторения нагрузки имеет криволинейный характер, приближаясь асимптотически к абсолютному пределу выносливости, равному нижней границе микротрещинообразования. Предел выносливости бетона необходимо знать при расчете железобетонных подкрановых балок, шпал и т. д.

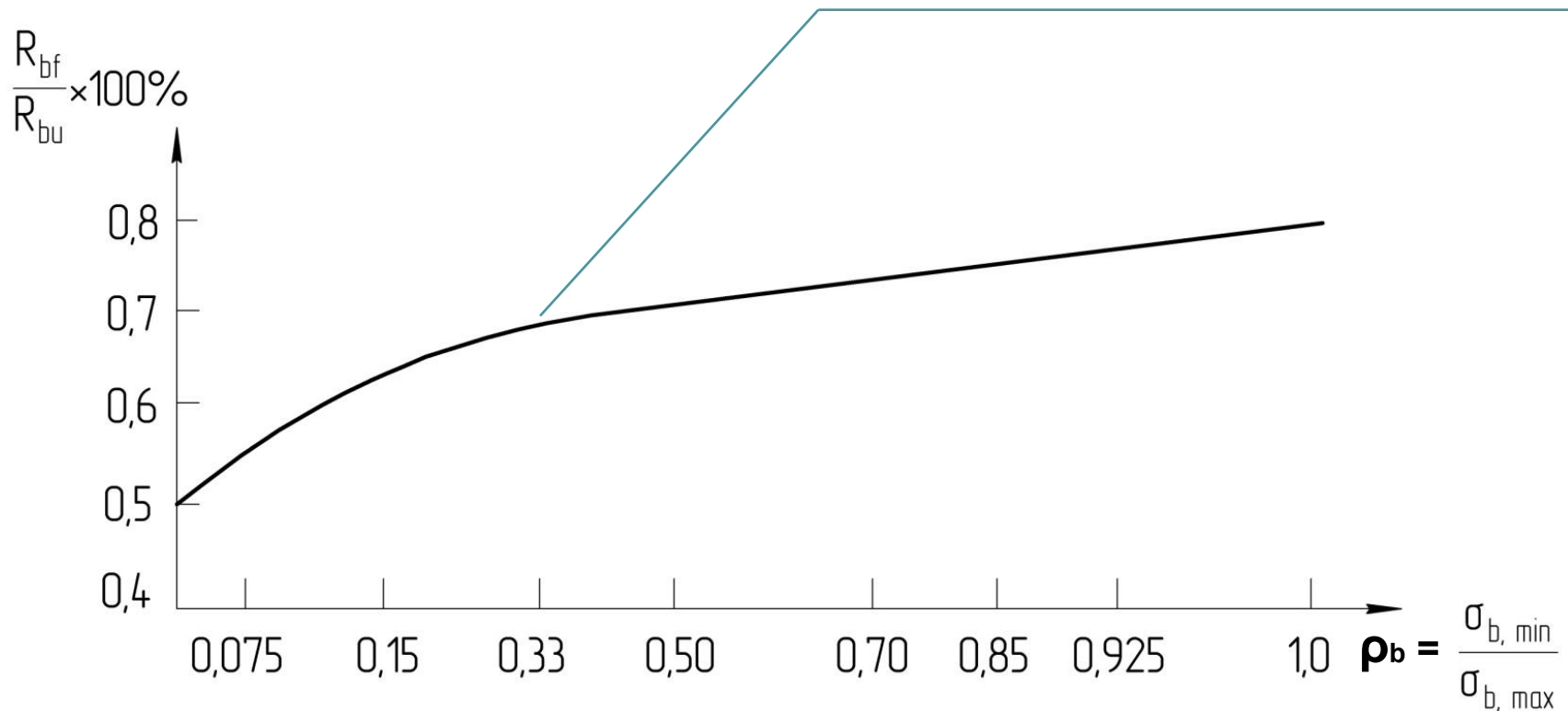


2.3.8. Влияние на прочность бетона длительных и многократно повторных нагрузок



2.3.8. Влияние на прочность бетона длительных и многократно повторных нагрузок

Зависимость прочности бетона от характера повторных нагрузений



2.3.9. Влияние на прочность бетона высоких и низких температур

Различие в коэффициентах линейного расширения цементного камня и заполнителей, при изменении температуры окружающей среды в пределах до 100°C (т. е. стесненные условия деформирования бетона при температурных воздействиях) не вызывает сколько-нибудь заметных напряжений и практически не отражается на прочности бетона.

Воздействие же на бетон повышенных температур (до 250-300°C) приводит к заметному изменению его прочности. Происходит интенсивное высыхание бетона и образование в нем микротрещин (главным образом вследствие значительных температурных и усадочных напряжений). При действии высоких температур дело обстоит еще хуже.

При температурах свыше 250-300°C объемные деформации у цементного камня и заполнителей меняются. Столь резкая разница в деформациях вызывает значительные внутренние напряжения, разрывающие цементный камень, что влечет за собой повреждение механической прочности бетона вплоть до его разрушения. При действии высоких температур обычные бетоны не применяются.

При замораживании бетона (т. е. при действии низких температур) прочность его повышается, а при оттаивании – снижается. Определяющее влияние на прочность бетона оказывает температура замораживания и степень водонасыщения бетона при его замораживании и оттаивании (с понижением температуры замораживания будет вырастать давление в порах бетона, и ускоряться его разрушение).



2.4. Деформации бетона

Для любых материалов, помимо данных о прочности, необходимо иметь характеристики деформативности, с помощью которых можно определять смещения.

Под деформативностью твердых тел понимают их свойство изменять размер и форму под влиянием силовых воздействий и несиловых факторов.

Исследования деформаций бетона в условиях совместной работы с арматурой (т. е. при наличии сцепления) позволяют решить вопрос о распределении усилий между ними. Помимо этого, изучение деформаций позволяет задаваться распределением напряжений в бетоне при расчете конструкций, определять момент появления трещин, их развитие, учитывать возможное перераспределение усилий.

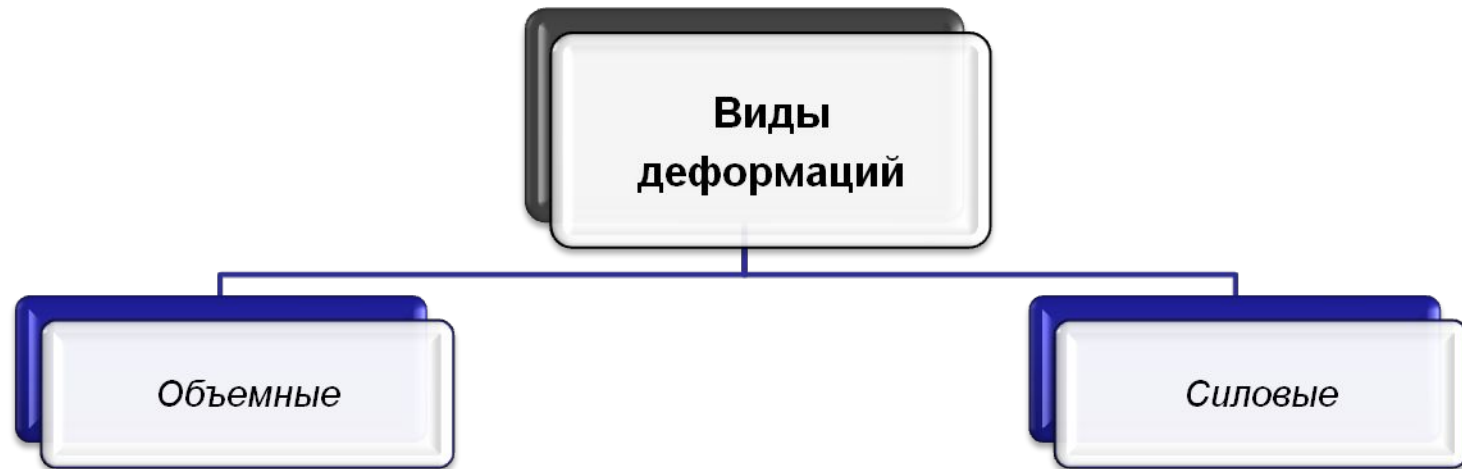
Деформации бетона имеют существенное значение также в предварительно напряженных конструкциях, в которых конечное значение напряжений обжатия бетона устанавливают с учетом неупругих деформаций.

Условно деформации бетона можно разделить на следующие виды:

- собственные деформации бетонной смеси (первоначальная усадка) и затвердевшего бетона (усадка и расширение), возникающие под действием физико-химических процессов, протекающих в бетоне;
- деформации от действия внешних нагрузок. При этом различают деформации от кратковременного действия статической нагрузки, от длительного действия нагрузки и деформации от многократно повторных загрузений;
- температурные деформации бетона.



2.4.1. Виды деформаций



Объемные деформации развиваются во всех направлениях под влиянием усадки, изменения температуры и влажности.

Силовые деформации развиваются главным образом вдоль направления действия сил. Силовым продольным деформациям соответствуют некоторые поперечные деформации.

Бетону свойственно нелинейное деформирование. Начиная с малых напряжений, в нем, помимо упругих деформаций, развиваются неупругие остаточные или пластические деформации.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

Под усадкой понимают способность бетона сокращаться в объеме при твердении на воздухе.

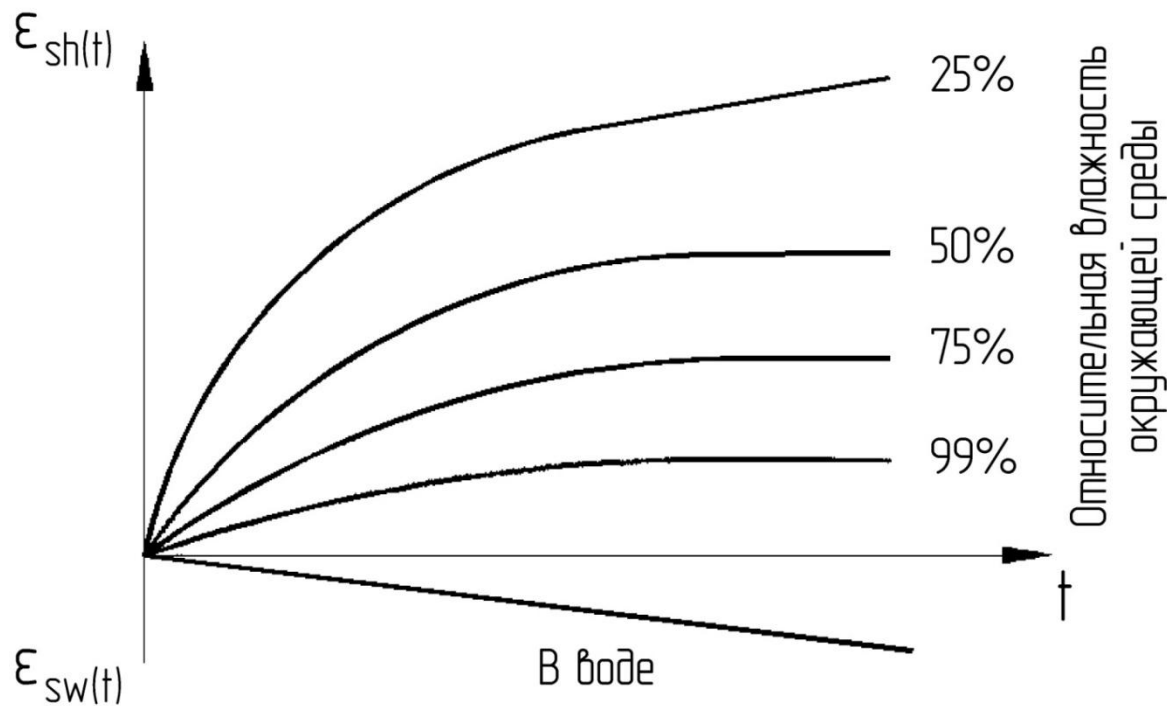
Первопричиной усадки цементного камня и соответственно бетона является уменьшение в геле количества свободной воды, которая уходит на испарение и гидратацию цемента, что вызывает сближение кристаллов цементного камня.

Существенное значение может иметь также капиллярное давление в порах цементного камня. Оно весьма значительно возрастает с уменьшением размеров пор. Так как микропоры рассеяны в цементном камне в различных направлениях, то давление, взаимно уравновешиваясь, действует как всестороннее сжатие, под влияние которого также происходят объемные деформации. Таким образом, процессы усадки во многом зависят от интенсивности испарения, которая определяется величиной влажностного перепада между бетоном и окружающей средой.

Полная (конечная) усадка цементного камня, высушенного до абсолютно сухого состояния, определяется только усадкой геля, так как усадка, вызванная действием капиллярных сил, полностью обратима.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона



Зависимость деформаций усадки и набухания от влажности окружающей среды

Усадка бетона зависит от ряда факторов:

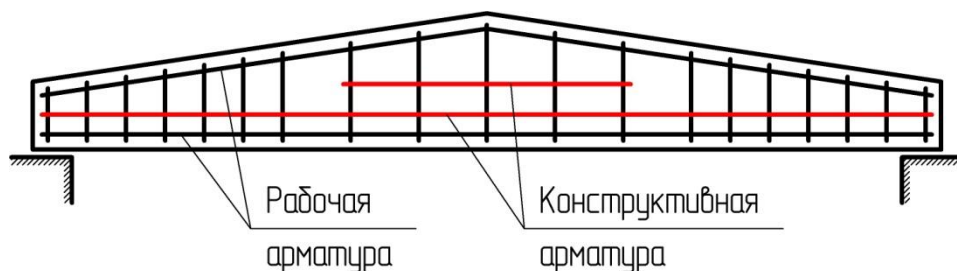
- количества и вида цемента;
- количества воды (чем больше В/Ц, тем больше усадка);
- крупности и вида заполнителей (при мелкозернистых песках и пористом щебне усадка больше);
- влажности среды твердения бетона.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

Усадке цементного камня в начальный период твердения препятствуют заполнители, которые становятся внутренними связями, вызывающими в цементном камне растягивающее напряжение. Поэтому начальные напряжения могут служить причиной микроразрушения в бетоне, причем, микротрещины появляются в основном на поверхностях сцепления заполнителей и цементного камня. Ко всему этому следует добавить неравномерное высыхание бетона по объему, что также ведет к возникновению начальных усадочных напряжений.

Открытые быстровысыхающие поверхностные слои бетона испытывают растяжение, в то время как внутренние, более влажные зоны, препятствующие усадке поверхностных слоев, оказываются сжатыми. Следствием таких растягивающих напряжений в еще не окрепшем бетоне являются поверхностные трещины.



При конструировании ж/б элементов устанавливают специальную противоусадочную арматуру, чтобы расстояние между любыми стержнями не превышало 400 мм.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

В евро нормах содержится методика по расчету деформации усадки.

Согласно EN 1992, полная деформация усадки состоит из двух компонентов: деформации высыхания и деформации, вызванной гидратацией цемента.

Полная деформация усадки ε_{cs} вычисляется так:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}, \quad (2.19)$$

где ε_{cd} - деформация высыхания,

ε_{ca} - деформация химической усадки.

Окончательное значение деформации высыхания равно $\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$. (2.20)

$\varepsilon_{cd,0}$ получают из таблицы усадки высыхания.

Развитие деформации усадки высыхания

во времени определяется: $\varepsilon_{cd}(t) = \beta(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0}$, (2.21)

где k_h и $\beta(t, t_s)$ - коэффициенты,

определяемые в соответствии с Еврокодом.

Деформация химической усадки определяется

из уравнения: $\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$, (2.22)

где $\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ (2.23)

и $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$, (2.24)

t-время в сутках.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

Значения номинальной свободной усадки высыхания для бетона

$f_{ck} / f_{ck,cube}$	Относительная влажность, %					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0,64	0,60	0,50	0,31	0,17	0
40/50	0,51	0,48	0,40	0,25	0,14	0
60/75	0,41	0,38	0,32	0,20	0,11	0
80/95	0,33	0,31	0,26	0,16	0,09	0
90/105	0,30	0,28	0,23	0,15	0,05	0

В таблице обозначены классы бетона:

f_{ck} - по прочности цилиндров;

$f_{ck,cube}$ - по прочности стандартных кубов



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

Под набуханием понимают способность бетона увеличиваться в объеме при сильном увлажнении (помещении в воду).

Процесс набухания бетона в воде намного быстрее усадки, потому что капиллярный подсос воды идет значительно быстрее, чем диффузия влаги при высыхании бетона. опыты показывают, что значение линейного набухания в 4-6 раз меньше линейной усадки и составляет не более 0,05-0,11 мм в год.

При набухании проникновение воды начинается с поверхности бетона, поэтому объем наружных слоев увеличивается, в то время как внутренний не успевает увеличиваться. Это вызывает в наружном слое бетона неопасные сжимающие напряжения, которые не учитывают при расчете железобетонных конструкций.

Продольное армирование бетонных образцов влияет на деформации набухания не менее значительно, чем на аналогичные деформации усадки, - снижает их более чем в 2 раза по сравнению с неармированными образцами.

При этом в бетоне армированных элементов возникают начальные сжимающие напряжения, а в арматуре – растягивающие.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

Температурными деформациями называют изменение объема в результате изменения температуры окружающей среды.

Температурные деформации бетона складываются из двух составляющих:

- свободной температурной деформации, пропорциональной изменению температуры;
- деформации, вызванной температурными напряжениями.

Свободные деформации определяются по формуле:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot (T - T_0), \quad (2.25)$$

где α_T - коэффициент линейного расширения бетона;
 T_0 и T - начальное и конечное значения температуры.

Если бетонный элемент нагревается равномерно по всему объему, и возникающие при этом свободные температурные деформации ничем не ограничиваются, то начальные температурные напряжения не появляются. В тех случаях, когда нагревание происходит неравномерно или температурные деформации стеснены, возникают температурные напряжения, которые при определенных условиях могут вызвать появления температурных трещин в бетоне.



2.4.2. Влажностные и температурные деформации бетона

Нормы по проектированию железобетонных конструкций в интервале температур от -20 до $+100^{\circ}\text{C}$ рекомендуют принимать значения коэффициента температурного расширения равным $\alpha_1=1 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. В наиболее часто встречаемых эксплуатационных ситуациях это значение мало отличается от коэффициента температурного расширения стали ($1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$).

При детальном анализе было установлено, что коэффициент α_1 для бетона претерпевает колебания в пределах от $0,75$ до $1,45 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. Существенное влияние здесь оказывает концентрация крупного заполнителя и его минералогический состав. В предельных случаях для бетонов на кварцевом песке следует принимать $\alpha_1 = 1,18 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$, тогда как тот же коэффициент на известняковом заполнителе составляет всего $\alpha_1 = 0,68 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$.

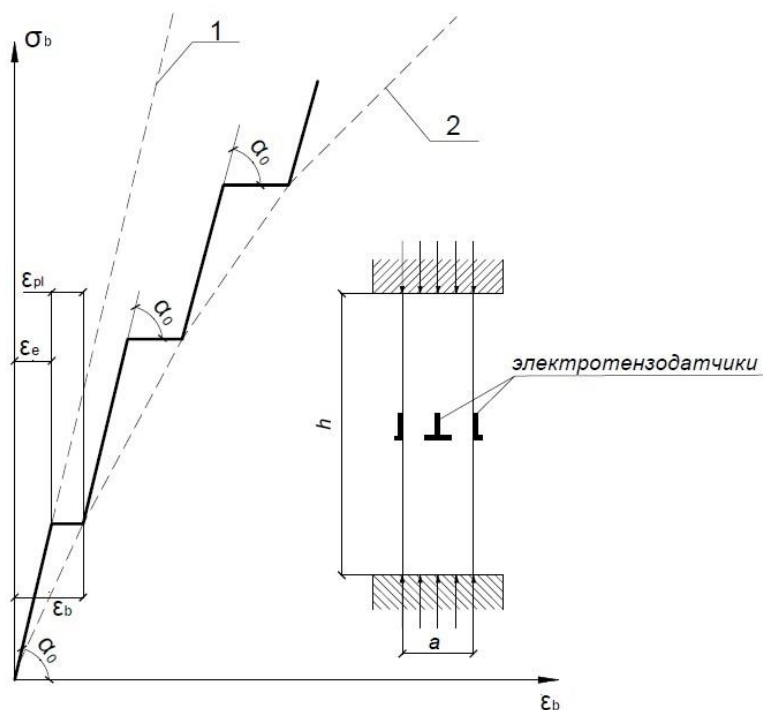
Коэффициент температурного линейного расширения для легкого бетона зависит от вида заполнителей и может изменяться от $0,4 \times 10^{-5}$ до $1,4 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. В случае, когда при расчетах конструкции температурные деформации не имеют определяющего значения, допускается принимать средние значения коэффициента температурного расширения равного $0,8 \times 10^{-5} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$.



2.4.3. Деформации бетона при однократном загружении

кратковременной нагрузкой

К построению опытной диаграммы $\sigma_b - \epsilon_b$ при приложении нагрузки ступенями



Опытный образец

- 1 – прямая упругих деформаций;
- 2 – кривая полных деформаций

Опытный образец загружается по ступеням величиной 0,1...0,2 от ожидаемой разрушающей нагрузки. На каждой ступени деформации измеряются дважды: первый раз – сразу после приложения нагрузки, второй – после выдержки в 5 – 7 минут под нагрузкой. График $\sigma_b - \epsilon_b$ представляет ступенчатую линию.

Деформации, измеренные сразу после приложения нагрузки, упругие ϵ_e , подчиняющиеся закону Гука; деформации, развивающиеся за время выдержки под нагрузкой, неупругие ϵ_{pl} и на графике представлены горизонтальными площадками.

Следовательно, полная деформация бетона на каждой ступени складывается из упругой ϵ_e и неупругой ϵ_{pl} .

При достаточно большом количестве ступеней нагружения зависимость можно изобразить плавной кривой.



2.4.3. Деформации бетона при однократном загружении

кратковременной нагрузкой

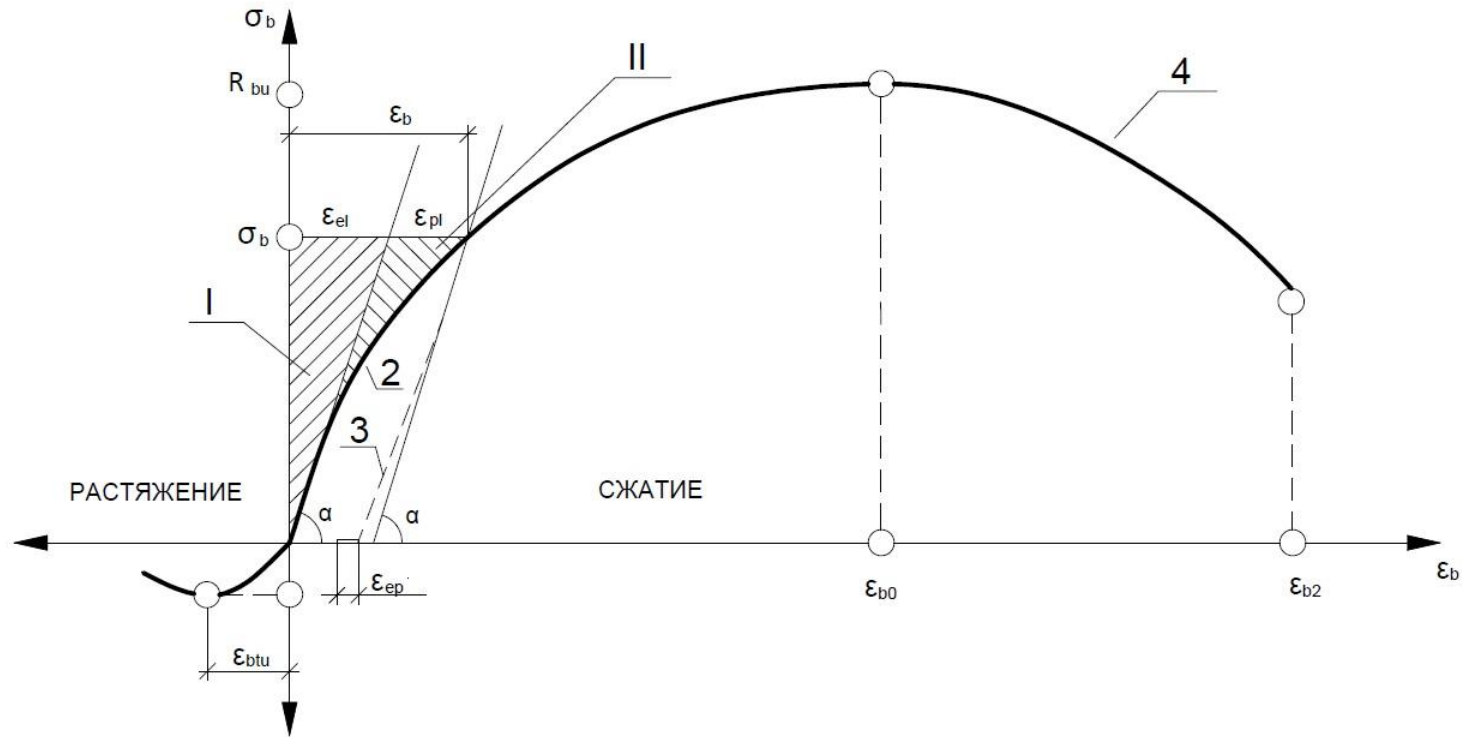


Диаграмма $\sigma_b - \epsilon_b$ при сжатии и растяжении

- I – область упругих деформаций; II – область неупругих деформаций;
- 1 – прямая упругих деформаций; 2 - восходящая ветвь диаграммы; 3 – разгрузка;
- 4 – нисходящая ветвь диаграммы;
- ϵ_{bu} – предельная сжимаемость; ϵ_{btu} – предельная растяжимость

2.4.3. Деформации бетона при однократном загружении

кратковременной нагрузкой

При однократном нагружении бетонной призмы кратковременно приложенной нагрузкой деформации бетона:

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}, \quad (2.26)$$

т.е. она складывается из упругой деформации ε_e и неупругой пластической деформации ε_{pl} .

Небольшая доля неупругих деформаций в течение некоторого периода времени после разгрузки восстанавливается (около 10%). Эта доля называется деформацией упругого последствия ε_{ep} .

Упругие деформации бетона соответствуют лишь мгновенной скорости нагружения образца, в то время как неупругие деформации развиваются во времени.

С увеличением скорости нагружения при одном и том же напряжении σ_b неупругие деформации уменьшаются.

При растяжении бетонного образца также возникают деформация:

$$\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl,t}, \quad (2.27)$$

складывающийся из упругой ε_{el} и пластической $\varepsilon_{pl,t}$ деформаций.



2.4.3. Деформации бетона при однократном загружении

кратковременной нагрузкой

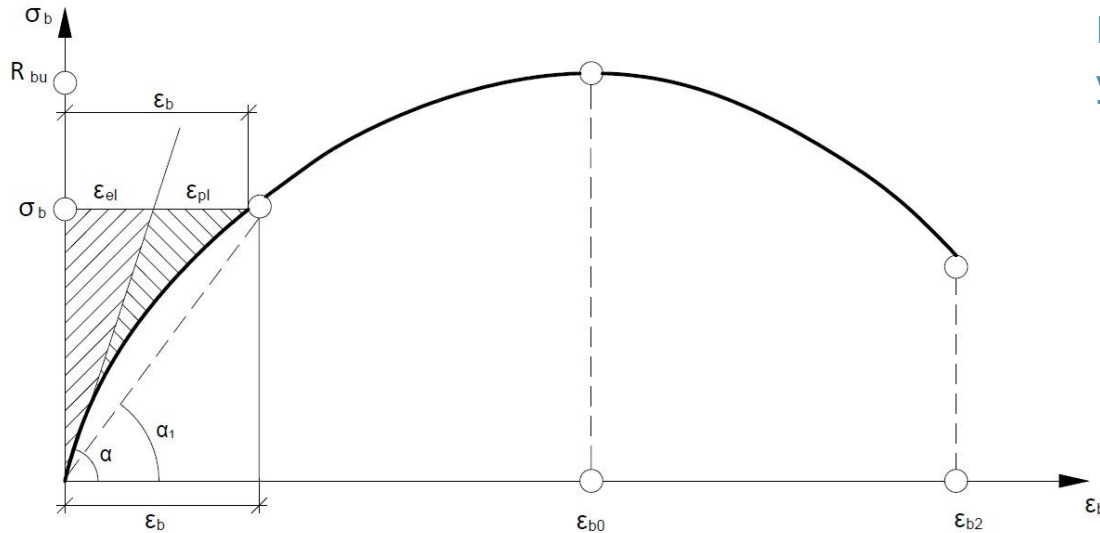


График по начальному модулю
упругости и модуль деформаций

$$E_b = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_{el}} \text{ - начальный модуль упругости;} \quad (2.28)$$

$$E'_b = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\sigma_b}{\varepsilon_b} \text{ - модуль деформации;} \quad (2.29), (2.30)$$

$$v_b = \frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_b} \text{ - коэффициент упругости.} \quad (2.31)$$

В практических расчетах коэффициент упругости можно определить в зависимости от уровня

напряжений $v_b = f(\eta)$, где $\eta = \frac{\sigma_b}{R_{bn}}$. (2.32)



2.4.4. Деформации при длительном действии нагрузки

При длительном действии нагрузки неупругие деформации бетона с течением времени увеличиваются. Наибольшая интенсивность нарастания неупругих деформаций наблюдается первые 3-4 мес. и может продолжаться несколько лет.

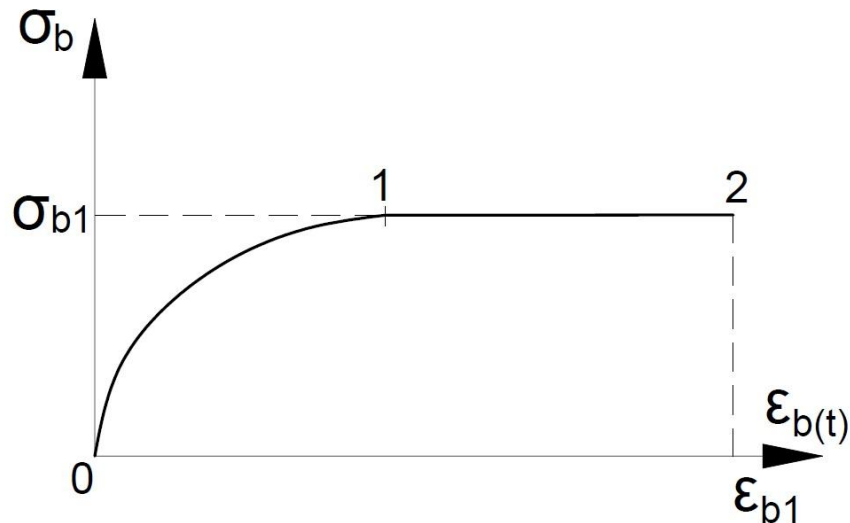


Диаграмма бетона при продолжительном испытании образцов на сжатие

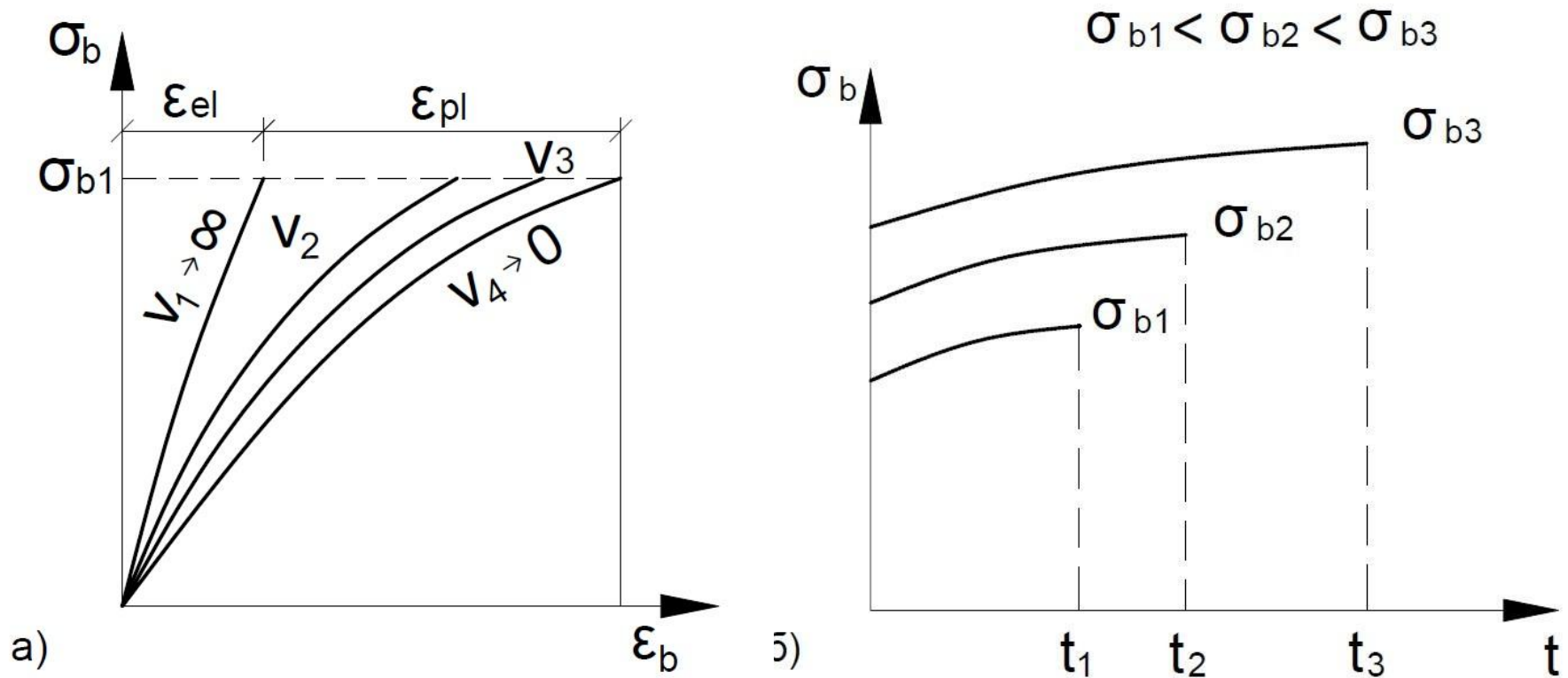
На диаграмме участок 0-1 характеризует деформации, возникающие при загрузке (его кривизна зависит от скорости нагружения); участок 1-2 характеризует рост деформаций за время t выдержки под нагрузкой при постоянных напряжениях. Прирост деформаций постепенно затухает. Их значение стремится к некоторому предельному.

Свойства бетона, характеризующиеся нарастанием неупругих деформаций с течением времени при постоянных напряжениях, называют **ползучестью бетона**.

Свойство бетона, характеризующееся уменьшением с течением времени напряжений при постоянной начальной деформации, называют **релаксацией напряжений**.



2.4.4. Деформации при длительном действии нагрузки



Деформации ползучести бетона в зависимости от скорости начального нагружения (а) и времени выдержки под нагрузкой t и напряжением (б)



2.4.4. Деформации при длительном действии нагрузки

Независимо от скорости нагружения, с которой было получено напряжение σ_{b1} , конечные деформации ползучести, соответствующие этому напряжению будут одинаковы. С ростом напряжений ползучесть бетона увеличивается.

Ползучесть и усадка бетона развиваются совместно.

Поэтому полная деформация бетона представляет собой сумму деформаций: упругой, деформации ползучести и усадки. Однако в то время как усадка носит характер объемной деформации, ползучесть развивается главным образом в направлении действия усилия.

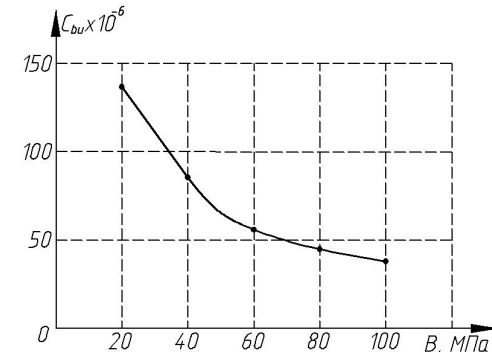
Для количественного определения деформаций ползучести пользуются понятием меры и характеристики ползучести.

$$\text{Мера ползучести: } C_b(t) = \frac{\varepsilon_{pl}(t)}{\sigma_b(t_0)}. \quad (2.33)$$

$$\text{Характеристика ползучести: } \varphi_b(t) = \frac{\varepsilon_{pl}(t)}{\varepsilon_{el}(t)}. \quad (2.34)$$

Между мерой и характеристикой ползучести существует связь: $C_b(t) = \varphi_b(t) \cdot E_b(t_0)$. (2.35)

где t – момент замера деформаций ползучести,
 t_0 – время загрузки.



Зависимость C_{bu} от класса бетона при напряжениях в бетоне $\sigma_b = 0,5R_b$

$\varepsilon_{pl}(t)$ – деформации ползучести,
 $\sigma_b(t_0)$ – действующие напряжения,
 $\varepsilon_{el}(t)$ – упругие деформации



2.4.4. Деформации при длительном действии нагрузки

В евро нормах содержится методика по определению деформации ползучести.

Согласно EN 1992, для времени $t = \infty$ деформации ползучести бетона $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ при постоянном напряжении сжатия σ_c , приложенном в возрасте бетона t_0 равны

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot (\sigma_c / E_c), \quad (2.36)$$

где E_c - касательный модуль упругости бетона в возрасте 28 суток;

σ_c - сжимающее напряжение в бетоне;

$\varphi(\infty, t_0)$ - коэффициент ползучести;

$f_{ck}(t_0)$ - цилиндрическая прочность на сжатие в период нагружения.

Если $\sigma_c < 0,45 f_{ck}(t_0)$, то значение коэффициента ползучести можно принять по соответствующей таблице Еврокода. В противном случае, ползучесть становится нелинейной. Тогда нелинейный коэффициент ползучести вычисляется по формуле:

$$\varphi_k(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \exp(1,5 \cdot (k_\sigma - 0,45)), \quad (2.37)$$

где $\varphi_k(\infty, t_0)$ - нелинейный коэффициент ползучести;

$k_\sigma = \sigma_c / f_{cm}(t_0)$ - относительное напряжение;

$f_{cm}(t_0)$ - среднее значение прочности на сжатие в период нагружения;

$\varphi(\infty, t_0)$ - коэффициент ползучести.



2.4.5. Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

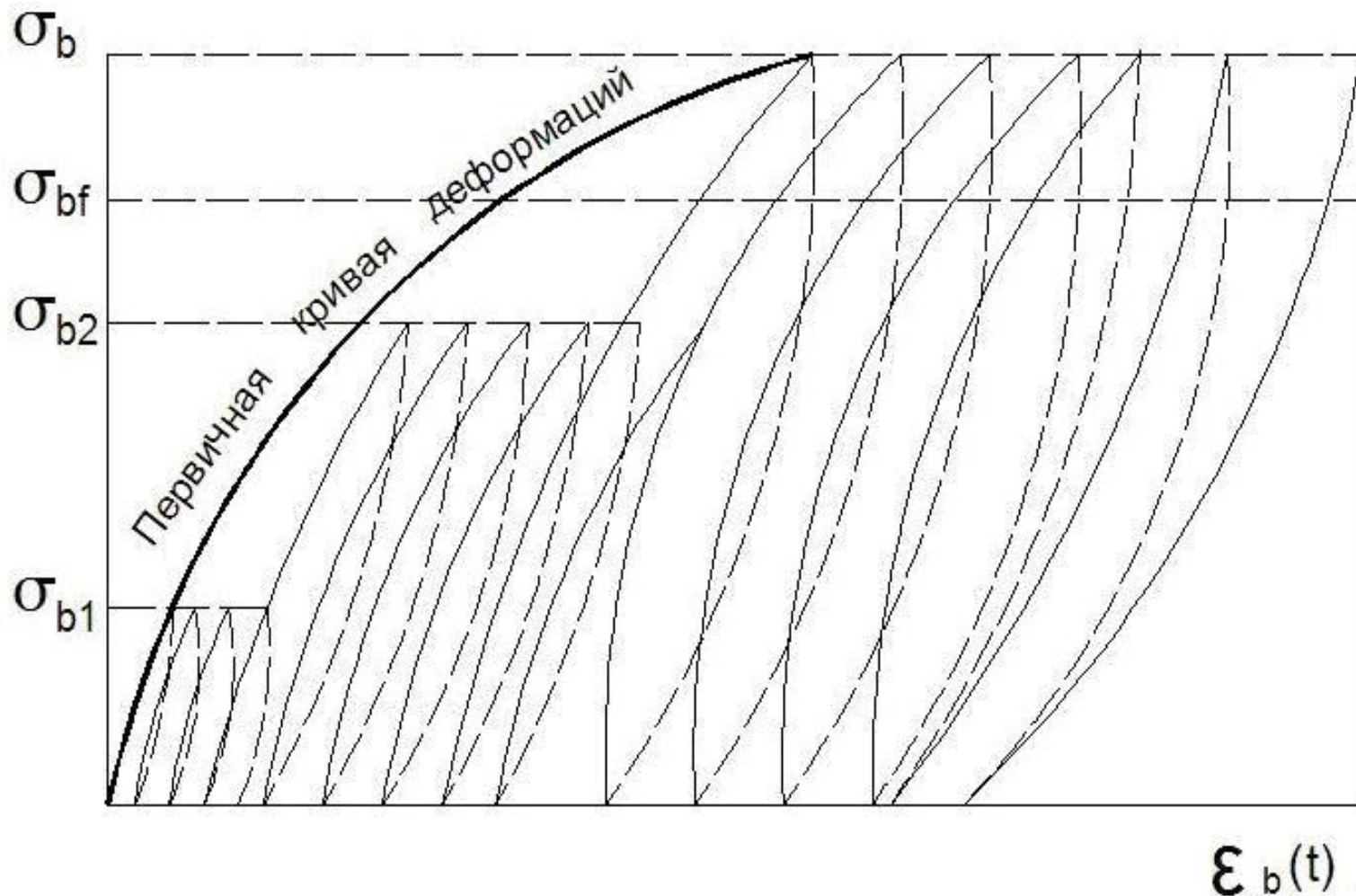


Диаграмма бетона при многократно повторном нагружении бетонного образца



2.4.5. Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

Многократное повторение циклов загрузки – разгрузки бетонной призмы приводит к постепенному накоплению неупругих деформаций. После достаточно большого числа циклов эти неупругие деформации, соответствующие данному уровню напряжений, постепенно выбираются, ползучесть достигает своего предельного значения, бетон начинает работать упруго.

На диаграмме показано, как с каждым последующим циклом неупругие деформации накапливаются, а кривая зависимости $\epsilon_b - \sigma_b$, постепенно выпрямляясь, становится прямой, характеризующей упругую работу. Такой характер деформирования наблюдается лишь при напряжениях, не превышающих предел выносливости $\sigma_b \leq R_{bf}$.

При больших напряжениях после некоторого числа циклов неупругие деформации начинают неограниченно расти, что приводит к разрушению образца, при этом кривизна линии зависимости $\epsilon_b - \sigma_b$ меняет знак, а угол наклона к оси абсцисс последовательно уменьшается.

При вибрационных нагрузках с большим числом повторений в минуту в интервале от 200 до 600 наблюдается ускоренное развитие ползучести бетона, называемое виброползучестью или динамической ползучестью.



2.5. Высококачественные конструктивные бетоны

В настоящее время в нормативных документах абсолютного большинства стран основной классификационной характеристикой бетона остается его прочность на сжатие.

В соответствии с требованиями российских и европейских норм к высокопрочным бетонам относят бетоны, имеющие класс по прочности на сжатие более В60, приготовленные по традиционным технологиям на портландцементном вяжущем и качественных рядовых заполнителях. При этом все больше внимания помимо прочности уделяется и другим важным конструктивно-технологическим характеристикам свойств бетонов (показателям долговечности, удобоукладываемости, плотности и т.д.).

Выражением нового взгляда на свойства бетонов является изменение терминологии (англ. *High-Strength Concrete – HSC*) повсеместно в технической литературе начали применять термин «высококачественный бетон» (англ. *High-Performance Concrete – HPC*), хотя достаточно часто используют комбинированное сокращение *HSC/HPC*.

В последнее время высококачественные бетоны подвергли дальнейшему разделению на группы, среди которых выделяют так называемый очень высококачественный бетон (англ. *Very High-Performance Concrete – VHPC*) и ультравысококачественный бетон (англ. *Ultra High-Performance Concrete – UHPC*). Это материалы, получаемые, главным образом, в специальных условиях и применяемые на практике пока в небольших объемах.



2.5. Высококачественные конструктивные бетоны

Очень высококачественный бетон – это бетон, получаемый в условиях строительства из составляющих исключительно высокого качества, но по традиционным технологиям с использованием портландцементного вяжущего. Различные источники приводят разные граничные значения прочности таких бетонов на сжатие, однако в большинстве случаев к ним относят бетоны классов от В100 до В150.

Несмотря на достигнутую высокую прочность, высококачественный бетон по-прежнему остается искусственным камнем, показывающим относительно низкую прочность при растяжении. Кроме того, высококачественным бетонам свойственно хрупкое разрушение (практически полное отсутствие нисходящей ветви на диаграмме деформирования), что требует применения более высоких значений коэффициентов безопасности по материалу при расчетах железобетонных конструкций. Высококачественные бетоны имеют повышенные значения деформаций усадки и ползучести.

Таким образом, основные направления работы по совершенствованию высококачественных бетонов связаны с повышением их прочности на растяжение и деформативности, т.е. исключения или снижения влияния факторов, приводящих к хрупкому разрушению структуры.



2.5. Высококачественные конструктивные бетоны

Ультравысококачественный бетон относится к последнему поколению материалов на основе портландцемента. Термин «*ультравысококачественный бетон*» был впервые использован американскими и французскими исследователями. Составы таких бетонов существенно отличаются от традиционных и, как правило, данный материал невозможно получить без применения дисперсного армирования структуры. Условно принято, что *UHPC* – это бетоны показывающие прочность при сжатии более 150 МПа. Очевидно, что эта группа бетонов в дальнейшем подвергнется еще более детальной классификации по мере развития их технологий, т.к. в различных вариантах производства существенно отличаются как составы, так и способы их получения.

Сейчас в публикациях, посвященных *UHPC*, выделяют три группы таких материалов:

1. Бетоны, получаемые с использованием реакционно-способных порошкообразных добавок высокой дисперсности (согласно термина, введенного специалистами французского концерна *Bouygues* – «*Beton de Poudres Reactive*»). В базовом варианте без применения дисперсного армирования такие бетоны способны показывать прочность при сжатии до 300 МПа, тогда как при использовании дисперсного микроармирования стальными волокнами и применении автоклавной обработки – до 810 МПа.
2. Уплотненный армоцементный композит (*CRC – Compact Reinforced Composite*), известный под коммерческим названием *COMPRESIT*, получен скандинавскими исследователями (фирма *Alborg Portland*, Дания). Сущность получения этого материала заключена в применении большого содержания стальных микроволокон (от 5% до 15% объема структуры), мелкозернистых высококачественных заполнителей, дополнительных технологических операций.



2.5. Высококачественные конструктивные бетоны

3. Композит *SIFCON* – соединение концепции армоцемента и микродисперсного армирования (англ. *Slurry Infiltrated Fibred Concrete*). В разработанном решении основа, представляющая собой каркас из арматурных стальных сеток, заполняется стальными микроволокнами, а затем под давлением нагнетается мелкозернистый бетон. Вариантом этой концепции является композит *SIMCON* (англ. *Slurry Infiltrate Mat Concrete*), в котором вместо сеток используют маты из стальных микроволокон, произвольно ориентированных в пространстве.

Все перечисленные бетоны нового поколения имеют общие отличительные признаки, к которым можно отнести:

- низкое водовяжущее отношение, т.е. отношение количества воды затворения к сумме цемента и активной микродобавке;
- большое содержание микрокремнезема (*silica fume*) или других высокодисперсных активных микродобавок;
- ограничение крупности заполнителя; как правило используются мелкозернистые бетоны, где в качестве заполнителя применяют высококачественные пески;
- большое содержание высококачественных пластифицирующих добавок.

Сравнение основных свойств традиционных и высококачественных бетонов представлено в таблице.



2.5. Высококачественные конструктивные бетоны

Сравнение некоторых свойств традиционных бетонов нового поколения

		Высококачественный бетон (HPC)	Ультравысококачественный бетон (UHPC)
1	2	3	4
Прочность на сжатие (МПа)	< 50	~ 100	~ 200
Модуль упругости (ГПа) в зависимости от заполнителей	25...35	40...50	50...80
Водовяжущее отношение	≥ 0,40	~ 0,30	< 0,20

Кроме перечисленных выше в настоящее время интенсивно развиваются технологии получения так называемых самоуплотняющихся высокопрочных бетонов (англ. *Self-Compacting HSC*), основным классификационным признаком которых является исходная подвижность бетонной смеси, а не показатель прочности. Такие бетоны характеризуются стандартным распылом не менее 500...700 мм, что позволяет укладывать их в конструкции сложной формы, насыщенные арматурой, без вибрационного уплотнения. При относительно малом содержании заполнителя и большом содержании цемента (до 600 кг/м³) эффект подвижности достигается при применении очень качественных пластификаторов в комплексе с другими добавками, уменьшающими сегрегацию бетонной смеси, тепловыделение при гидратации портландцемента.

