

## Лекция 2

# Бетон для железобетонных конструкций

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

Хотя бетон представляет собой материал грубо неоднородной структуры, ему можно придавать вполне определенные наперед заданные **прочностные, деформативные и физические** свойства.

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, морозожаростойкость, коррозионную стойкость бетона относят водонепроницаемость, морозожаростойкость, коррозионную стойкость, огнестойкость, тепло- и звукопроводность, кислотостойкость

Физико-механические свойства бетона зависят от способа его изготовления и материалов: вяжущего, крупного и мелкого заполнителя и воды. Они определяются структурой бетона и условиями его твердения.

В зависимости от требований морозостойкости, водонепроницаемости, огнестойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости при агрессивном воздействии среды бетоны классифицируют.

# Классификация бетона по

## 1) структуре

- **плотный бетон**, в котором пространство между зернами заполнителя полностью занято затвердевшим вяжущим ;
- **крупнопористый** (малопесчаный и беспесчаный) - с частично заполненным пространством между зернами заполнителя;
- **поризованный**, в котором вяжущее между зернами заполнителя поризовано с помощью специальных добавок; ;
- **ячеистый** - с искусственно созданными замкнутыми порами; повышение плотности структуры бетона ведет к повышению его прочности.

# Классификация бетона по

## 2) средней плотности ( $\text{кг/м}^3$ ) :

- **особо тяжелые** со средней плотностью более 2500;
- **тяжелые** - 2200...2500 ;
- **облегченные** - 1800...2200;
- **легкие** - 500...1800 ;

**Марка бетона по плотности**  $D$  характеризует его среднюю плотность в  $\text{кг/м}^3$  и назначается для бетонов, к которым предъявляются требования теплоизоляции. Нормами установлены следующие марки  $D$ . Тяжёлый бетон – от  $D 2200$  до  $D 2500$ ; лёгкий бетон от  $D 800$  до  $D 2000$  и т.п.

## Классификация бетона по

### 3) виду вяжущего:

- **цементные;**
- **полимерцементные;**
- **на известковом вяжущем (селикатные);**
- **гипсовом вяжущем;**
- **смешанных и специальных вяжущих.**

## Классификация бетона по

### 4) виду заполнителей :

- **на плотных естественных заполнителях** (гравий или щебень горных пород, кварцевый песок) ;
- **на пористых естественных** (перлит, пемза, ракушечник) или **искусственных** (керамзит, шлак) заполнителях);
- **на специальных заполнителях**, удовлетворяющих требованиям биологической защиты, жаростойкости, химической стойкости ;



## Классификация бетона по

### 5) зерновому составу :

- **крупнозернистый** с крупными и мелкими заполнителями;
- **мелкозернистый** с мелкими заполнителями.

## Классификация бетона по

### б) условиям твердения:

- бетон **естественного твердения** ;
- бетон, подвергнутый **тепловлажностной обработке** при атмосферном давлении или **автоклавной обработке** при **высоком давлении** .

Бетоны, применяемые для несущих железобетонных конструкций, сокращенно называют :

- **тяжелый бетон** - бетон плотной структуры, на плотных заполнителях, крупнозернистый на цементном вяжущем, при любых условиях твердения; *сред. плотностью 2200...2500кг/м<sup>3</sup>*;
- **мелкозернистый бетон** - бетон плотной структуры, тяжелый, на мелких заполнителях, на цементном вяжущем, при любых условиях твердения; *сред. плотностью более 1800кг/м<sup>3</sup>*;
- **легкий бетон** - бетон плотной и поризованной структуры, на пористых заполнителях, крупнозернистый, на цементном вяжущем, при любых условиях твердения; при равной прочности, морозостойкости и водонепроницаемости применяют в конструкциях наравне с тяжелым бетоном

## Морозостойкость

Под морозостойкостью понимают **способность материала в увлажненном состоянии сопротивляться разрушающему воздействию попеременного замораживания и оттаивания.**

Бетон является морозостойким, если он выдерживает 50...500 и более циклов попеременного замораживания и оттаивания. Решающее влияние на морозостойкость бетона оказывают водоцементное отношение и структура.

Нормами установлены **марки бетона по морозостойкости**: F50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500. Эти марки характеризуется количеством циклов замораживания и оттаивания бетона при снижении его прочности на сжатие не более, чем на 15%.

## Водонепроницаемость

Под водонепроницаемостью понимают **способность материала не пропускать воду**.

Тяжелый бетон и бетон на пористых заполнителях фильтруют воду. Это обусловлено тем, что при водоцементном отношении  $V/C > 0,2$  свободная вода, не связанная химически с цементом, при испарении образует в бетоне поры.

Плотность бетона повышают посредством разнообразных добавок.

**Марка бетона по водонепроницаемости  $W$**  назначается для конструкций, работающих под давлением воды. Марка  $W$  характеризует предельное давление в  $\text{кг/см}^2$ , при котором вода ещё не просачивается через бетонный образец толщиной 150 мм. Нормами установлены марки  $W$  2; 4; 6; 8; 10; 12.

## Огнестойкость

Под огнестойкостью понимают **способность материала сохранять прочность при пожаре** (1000...1100 °С). Бетон является более огнестойким материалом, чем сталь, так как при температурах пожара он практически сохраняет свои прочностные и деформативные свойства.

Конструкции из стали обрушиваются уже при температуре 600...700°С. Повышение огнестойкости железобетонных конструкций достигают увеличением защитного слоя бетона до 3...4 см.

## Жаростойкость

Под жаростойкостью понимают **способность бетона сохранять прочность при длительном воздействии высоких температур** (выше 200 °С). Длительное воздействие высоких температур разрушает обычный тяжелый бетон и бетон на пористых заполнителях вследствие обезвоживания цементного камня, деформаций цементного камня и заполнителей. Поэтому нормы запрещают применять обычный бетон при длительном воздействии температур свыше 50° С. В целях увеличения жаростойкости бетона применяют специальные заполнители: базальт, хромит, шамот, доменные шлаки и вяжущее: глиноземистый цемент, портландцемент с добавками, жидкое стекло. В охлажденном состоянии сцепление бетона с арматурой периодического профиля сохраняется. Жаростойкий бетон применяют для фундаментов доменных печей и разнообразных тепловых агрегатов, туннельных печей.

## Коррозионная стойкость

Под коррозионной стойкостью понимают способность материала не вступать в химическую реакцию с окружающей средой. Эксплуатационные условия большинства зданий и сооружений являются нормальными для бетона, поэтому в нем не происходит никаких коррозионных процессов. В агрессивных средах (жидких или газообразных) коррозионная стойкость бетонов снижается.



## Структура бетона

Структура оказывает решающее **влияние на прочностные и деформативные** характеристики бетона. Она грубо неоднородна и зависит от многочисленных факторов:

зернового состава крупных и мелких заполнителей

объемной концентрации цементного камня

водоцементного отношения

способов уплотнения

условий твердения

степени гидратации цементного камня и др.

## Структура бетона

Структура бетона формируется в виде пространственной решетки из цементного камня, заполненной зернами крупных и мелких заполнителей и пронизанной многочисленными микропорами и капиллярами, содержащими химически несвязанную воду, водяные пары и воздух.

Поэтому **бетон** представляет собой **капиллярно-пористый каменный материал**, в котором нарушена сплошность и присутствуют все три фазы:

- твердая,
- жидкая
- газообразная

## Структура бетона

**Структура цементного камня** в бетоне также **сложна и неоднородна**. Цементный камень состоит из упругого кристаллического состава и наполняющей его вязкой массы - геля. Сочетание упругой и вязкой структурных составляющих цементного камня **наделяет бетон свойствами упругопластично-ползучего тела**. Эти свойства проявляются в поведении бетона под нагрузкой и в его взаимодействии с внешней средой. Для гидратации зерен клинкера и затвердения цементного камня в бетоне достаточно **В/Ц не более 0,2**. Для лучшей **удобоукладываемости бетонной смеси В/Ц увеличивают до 0,5...0,6**. Излишек воды испаряется и образует в цементном камне многочисленные поры и капилляры, что снижает прочность бетона и увеличивает его деформативность.

## Структура бетона

**Общий объем пор** в цементном камне при нормальных условиях твердения составляет **25...40%** от объема цементного камня. Размеры их весьма малы: **60...80%** объема пор приходится на долю капилляров с радиусом до 1 мкм (10<sup>-4</sup> см). **С уменьшением В/Ц пористость цементного камня уменьшается и прочность бетона увеличивается.** Поэтому на предприятиях сборного железобетона применяют преимущественно **жесткие бетонные смеси (В/Ц = 0,3...0,4)**. Бетоны из жестких смесей обладают меньшей деформативностью, требуют меньшего расхода цемента.

## Основы прочности

Прочность бетона зависит от многочисленных факторов:

структуры

марки и вида цемента

водо-цементного отношения

вида и прочности крупных и мелких заполнителей

условий твердения

вида напряженного состояния

формы и размера образцов

длительности загрузки.

# Прочность бетона

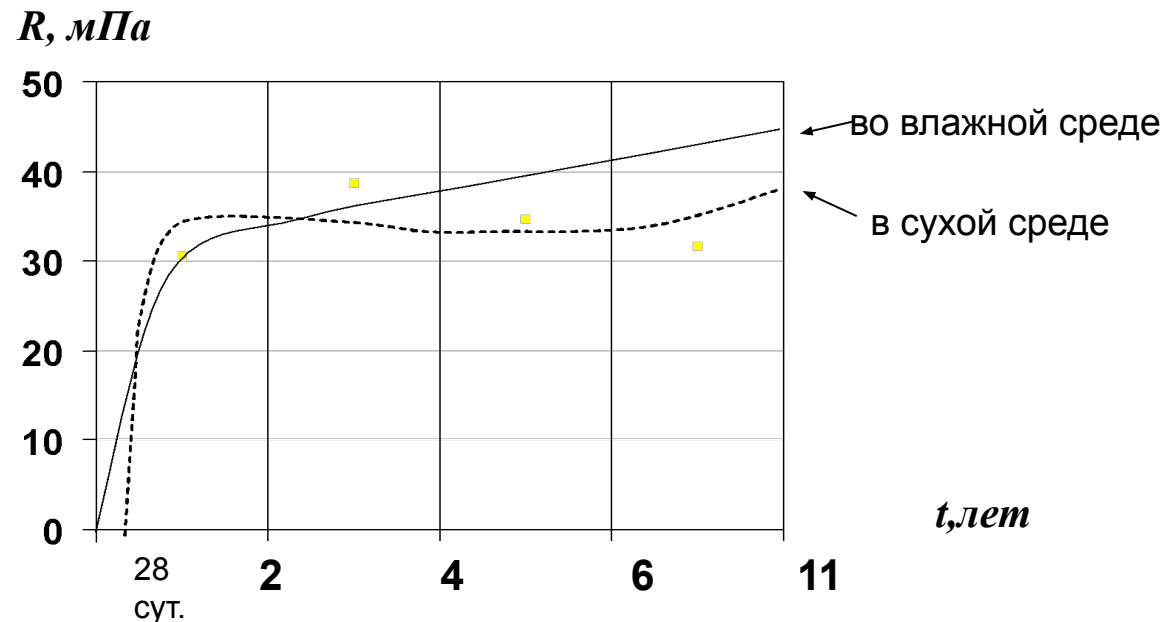
Прочность бетона зависит от ряда факторов, основными из которых являются:

- 1) время и условия твердения,;
- 2) вид напряженного состояния;
- 3) форма и размеры образцов;
- 4) длительность нагружения;
- 5) многократность повторных нагрузок.

# Прочность бетона

## - время и условия твердения

Прочность бетона нарастает с течением времени. Наиболее интенсивный ее рост происходит в начальный период твердения (28 сут для портландцемента). В дальнейшем нарастание прочности замедляется, но при положительной температуре и влажной среде продолжается еще годы.

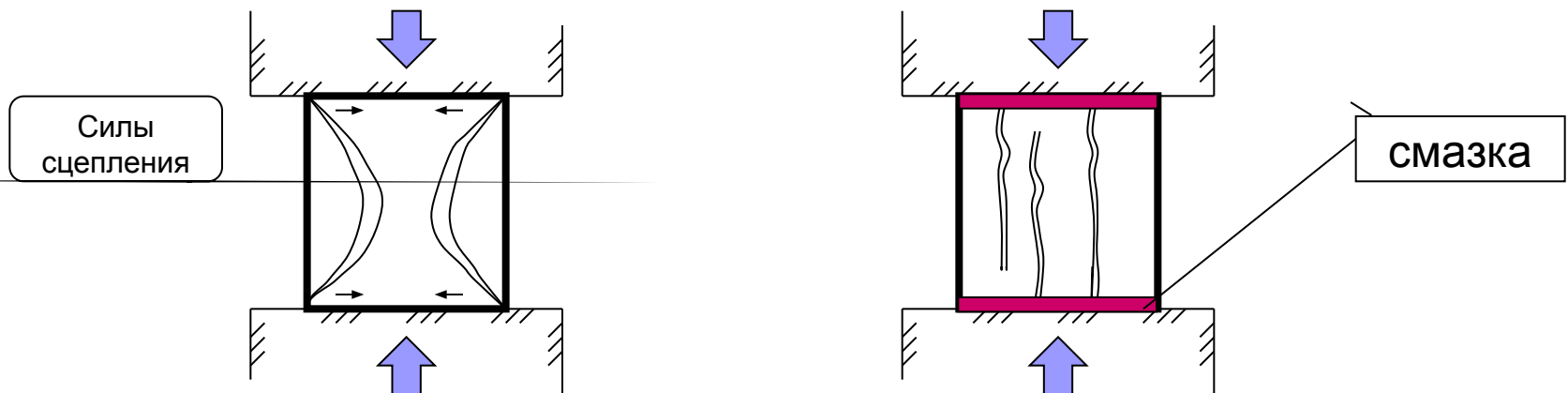


# Прочность бетона

## - вид напряженного состояния;

Бетон имеет различную прочность при разных силовых воздействиях.

**Кубиковая прочность**  $R$  — временное сопротивление сжатию бетонных кубов. При осевом сжатии кубы (как и другие сжатые образцы) разрушаются вследствие разрыва бетона в поперечном направлении.





# Кубиковая прочность бетона

Согласно ГОСТу кубы испытывают без смазки поверхностей. Вследствие влияния сил трения прочность кубов зависит от их размеров. Чем меньше размер куба, тем больше его прочность. Так, если прочность кубов с ребром 15 см принять за  $R$ , то кубы с ребром 10 см покажут прочность  $1,127R$ , а с ребром 20 см —  $0,93R$ .

Поскольку реальные конструкции по форме отличаются от кубов, **кубиковая прочность** непосредственно в расчетах не используется, а **служит только для контроля качества бетона.**

# Призменная прочность бетона

**Призменной прочностью  $R_b$  называют временное сопротивление сжатию бетонных призм.** Она является основной расчётной характеристикой прочности бетона сжатых элементов. Призменная прочность меньше кубиковой. опыты показывают, что с увеличением высоты призмы ( $h$ ) влияние сил трения на прочность уменьшается и при отношении оно практически становится равным нулю, а значение  $R_b$  становится постоянным и равным примерно  $0,75R$ .

# Прочность бетона на растяжение

**Прочность бетона на растяжение**  $R_{bt}$  зависит от прочности цементного камня. При растяжении прочность бетона в 10-20 раз меньше прочности на сжатие.

Связь между временным сопротивлением бетона на сжатие и растяжение может быть выражена формулами:

$$R_{bt} = 0,23\sqrt[3]{R_b^2}$$

Для высокопрочных тяжёлых бетонов

$$R_{bt} = 0,5\sqrt[3]{R_b^2}$$

# Прочность бетона на растяжение

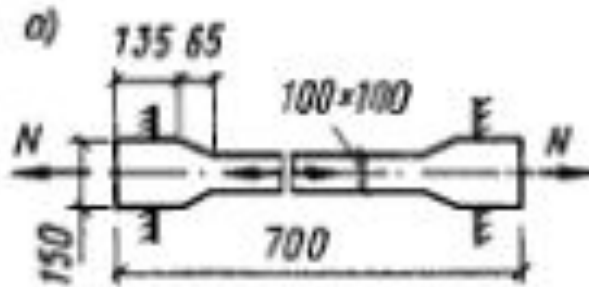
Вследствие неоднородности структуры бетона эти формулы не всегда дают правильные значения  $R_{bt}$ . Значение  $R_{bt}$  определяют испытаниями на разрыв образцов в виде восьмерки, на раскалывание образцов в виде цилиндров, на изгиб — бетонных балок. По разрушающему моменту бетонной балки определяют

$$R_{bt} = M/\gamma W = 3,5M/bh^2,$$

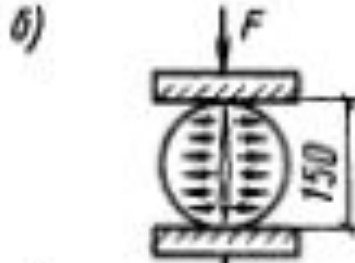
где  $W=bh^2/6$  — момент сопротивления прямоугольного сечения;

$\gamma=1,7$  — множитель, учитывающий криволинейный характер эпюры напряжений в бетоне растянутой зоны сечения вследствие развития неупругих деформаций.

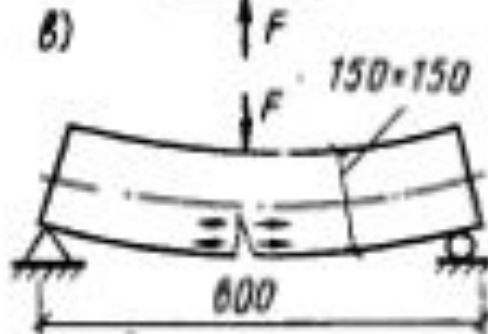
# Прочность бетона на растяжение



разрыв образцов в виде восьмерки



раскалывание образцов в виде цилиндров



изгиб бетонных балок.

Схемы испытания образцов для определения прочности бетона на растяжение

# Прочность бетона на срез

В реальных конструкциях срез в чистом виде не встречается. Прочность бетона на срез в 1,5 – 2 раза больше, чем его прочность на растяжение. Объясняется это сопротивлением зёрен крупного заполнителя срезывающим усилиям.

Значение временного сопротивления не нормируется, однако при необходимости оно может быть определено по эмпирической формуле:

$$R_{b.sh} = 0,7 \sqrt{R_b \cdot R_{bt}}$$

## Прочность при длительных и быстрых погружениях.

При испытании бетонных образцов в лабораторных условиях нагружение осуществляют достаточно быстро [ $v=20...30 \text{ Н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ]. Реальные конструкции находятся под действием нагрузки десятки лет. В этом случае в бетоне развиваются структурные изменения и неупругие деформации, приводящие к снижению его прочности. Предел длительного сопротивления бетона осевому сжатию принимается  $0,9 R_b$ . При нагрузках малой продолжительности (порыв ветра, удар, взрыв) бетон разрушается при больших напряжениях -  $(1,1...1,2)R_b$ .

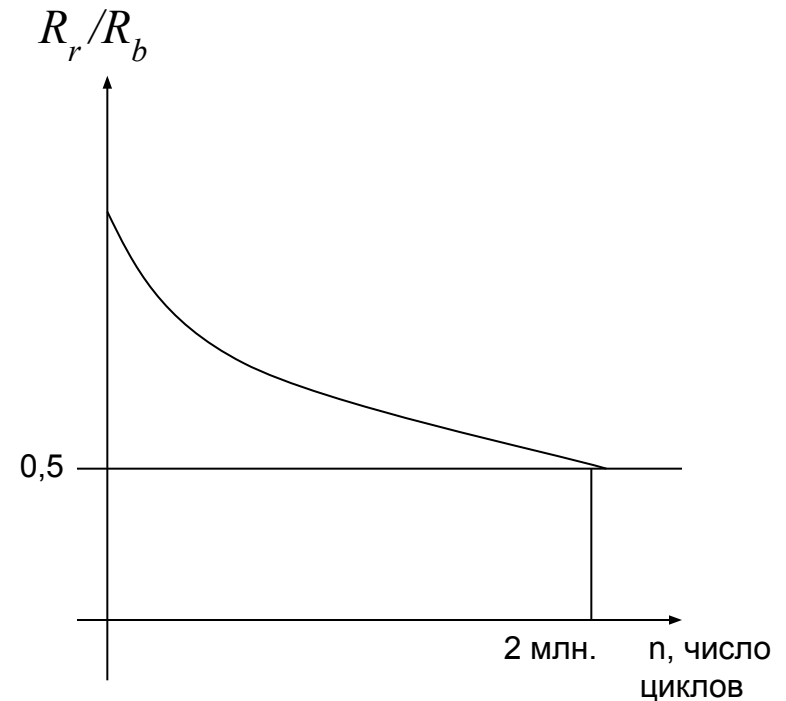
## Прочность бетона при многократно повторных нагрузках

При действии многократно повторных нагрузок с повторяемостью в несколько миллионов циклов временное сопротивление бетона сжатию под влиянием развития структурных микротрещин уменьшается. **Предел прочности бетона при многократно повторных нагрузках или предел выносливости бетона  $R_r$** , согласно опытным данным, зависит от числа циклов нагрузки и разгрузки и отношения попеременно возникающих минимальных и максимальных напряжений. Практический предел выносливости  $R_r$  (на ограниченной базе  $n=2 \cdot 10^6$ ) зависит от характеристики цикла  $\rho$  почти линейно, его наименьшее значение  $R_r = 0,5 R_b$



## Прочность бетона при многократно повторных нагрузках

Значение  $R_r$  необходимо для расчета на выносливость железобетонных конструкций, испытывающих динамические нагрузки — подкрановых балок, перекрытий некоторых промышленных зданий и т. п.



# Деформативность бетона

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

В соответствии с этим деформации твердых тел разделяют на:

## а) Объёмные деформации

**Деформации от изменения температуры.** Повышение или понижение температуры вызывает изменение объёма бетона. При этом деформации прямо пропорциональны температурному градиенту  $\Delta t$  и коэффициенту линейного расширения  $\alpha_{bt} \cong 1 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1}$ . Определение температурных деформаций производится по формулам сопротивления материалов. Следует отметить, что коэффициенты линейного расширения стали и бетона примерно одинаковы, что обеспечивает их совместную работу.

$$\alpha_{st} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1} \quad (\alpha_{bt} = 1 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1})$$

# Деформативность бетона

## Деформации усадки и набухания

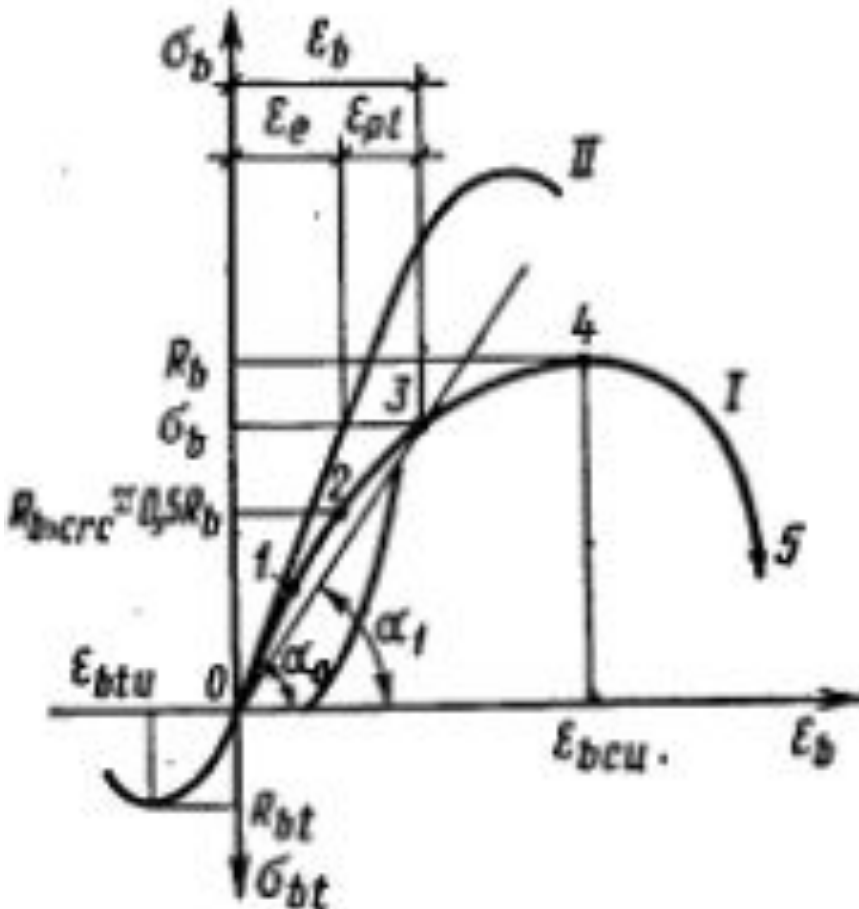
Свойство бетона уменьшаться в объёме при твердении в сухой среде **называют усадкой**, а при твердении во влажной среде бетон увеличивается в объёме – происходит набухание.

Деформация усадки связана с потерей воды на испарение и на гидротацию цемента. Усадка тем больше, чем больше содержание в бетоне цемента, воды и чем ниже влажность окружающей среды.

Деформация бетона **при набухании** значительно меньше, чем при усадке.

## б) Силовые деформации

При непрерывном нагружении испытываемого образца зависимость  $\sigma$  -  $\varepsilon$  может быть представлена в виде плавной кривой



Участок **0-1** характеризует деформации, возникающие при нагружении (упругие) ( $\sigma \leq 0,2R_b$ )

**1-2** характеризует нарастание неупругих деформаций при постоянном напряжении ( $0,2R_b \leq \sigma < 0,5R_b$ )

**2-3** после появления микротрещин  $R_{b,crc}$ , быстро растут пластические деформации

При увеличении нагрузок микротрещин соединяются и образец разрушается, точка **4** соответствует предельным сопротивлению  $R_b$  и деформацию образца  $\varepsilon_{b,cu}$

## б) Силовые деформации

Свойство бетона увеличивать неупругие деформации при длительном действии постоянной нагрузки **называют ползучестью бетона.**

Различают ползучесть **линейную** и **нелинейную**. Линейная ползучесть имеет место при малых напряжениях и связана с перераспределением напряжений с гелевой составляющей цементного камня на заполнители. **При  $\sigma_b > 0,5R_b$  в бетоне возникают микротрещины, линейная зависимость нарушается и наступает нелинейная ползучесть.**

С течением времени процесс перераспределения напряжений затухает и деформации ползучести прекращаются.

**Деформация ползучести** увеличивается с уменьшением влажности среды, увеличением водоцементного отношения и количества цемента. Загруженный в раннем возрасте бетон обладает большей ползучестью, чем старый. С повышением прочности бетона и прочности заполнителей ползучесть уменьшается. Бетоны на пористых заполнителях обладают большей ползучестью, чем тяжёлые бетоны

## Предельные деформации бетона

Предельные деформации бетона, т.е. деформации перед разрушением, зависят от многих причин и изменяются в значительных пределах. Для расчётов принимают:

при осевом кратковременном сжатии:  $\varepsilon_{bu} = 2 \cdot 10^{-3}$

длительном  $\varepsilon_{bu} = 2,5 \cdot 10^{-3}$

при растяжении  $\varepsilon_{btu} = 1,5 \cdot 10^{-4}$

## Модуль деформации и модуль упругости

Модуль упругости или начальный модуль упругости бетона при сжатии  $E_b$  соответствует только упругим деформациям, возникающим при мгновенном нагружении.

Связь между напряжениями и деформациями в этом случае устанавливается законом Гука

$$\sigma_b = \varepsilon_b E_b$$

где  $E_b$  - начальный модуль упругости бетона; геометрически он определяется как тангенс угла наклона прямой упругих деформаций

$$E_b = \operatorname{tg} \alpha_0$$



Модуль полных деформаций является величиной переменной. Геометрически он может быть определён как тангенс угла наклона касательной к кривой  $\sigma_b - \varepsilon_b$  в точке с заданным напряжением :

$$E'_b = \operatorname{tg}\alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Определение полных деформаций становится затруднительным в силу неопределённости  $E'_b$ .

Для практических расчётов было предложено выразить напряжение через полные деформации с помощью упруго-пластического модуля  $E'_{bpl}$  равного тангенсу угла наклона секущей, проходящей через начало координат и точку кривой с заданным напряжением

$$E'_{bpl} = \operatorname{tg}\alpha_1$$

Выразив одно и то же напряжение через упругие и полные деформации, можно получить связь между модулем упругости  $E_b$  и модулем упругопластичности  $E'_{bpl}$ .

$$\sigma_b = \varepsilon_b E_b = \varepsilon_b E'_{bpl}$$

откуда

$$E'_{bpl} = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_b} E_b = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pl} + \varepsilon_b} E_b = \nu E_b$$

или

$$E'_{bpl} = \nu E_b$$

По данным опытов, коэффициент  $\nu$  меняется от 1 до 0,45 при кратковременном нагружении и до 0,15 при длительном нагружении.

При растяжении  $E_{btp} = \nu_t E_b$

где  $\nu_t$  - коэффициент, характеризующий упругопластические свойства бетона при растяжении  $\nu_t = 0,5$ .

## Показатели качества бетона

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций в зависимости от их назначения и условий эксплуатации нормами устанавливаются показатели качества бетона:

**-Класс бетона по прочности на сжатие  $B$  (3,5...60)**

основная характеристика

**- Класс бетона по прочности на растяжение  $B_t$  (0,8...3.2)**

**- Проектные марки по морозостойкости  $F$  (50...500)**

**- Марки по водонепроницаемости  $W$  (2...12)**

**-Марки по средней плотности  $D$  (2300...2500) тяжёлый бетон**

**$D$  (1800...2400) мелкозерн. бетон**

**$D$  (800...2100) легк. бетон**