

ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОНА

Виды деформаций

- Объемные
- Силовые

Объемные деформации

• Температурные:

$\alpha_{bt} = 1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ для тяжелого, мелкозернистого и бетона на пористых заполнителях;

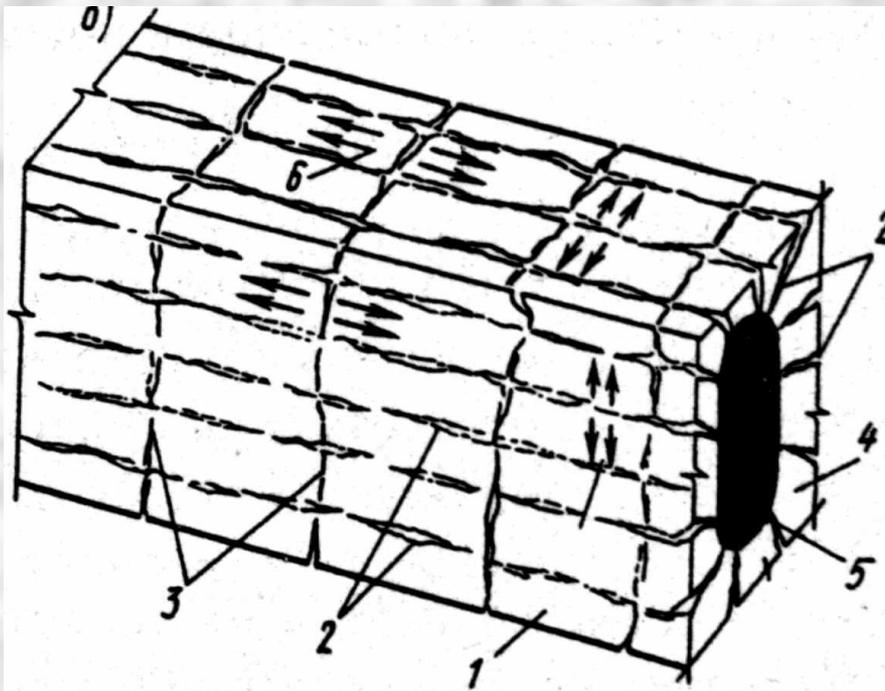
$\alpha_{bt} = 0,7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$ для легких бетонов на мелких пористых заполнителях

Объемные деформации

• Усадочные:

$\varepsilon_{sl} = 3,0 \times 10^{-4}$ (тяжелые бетоны);

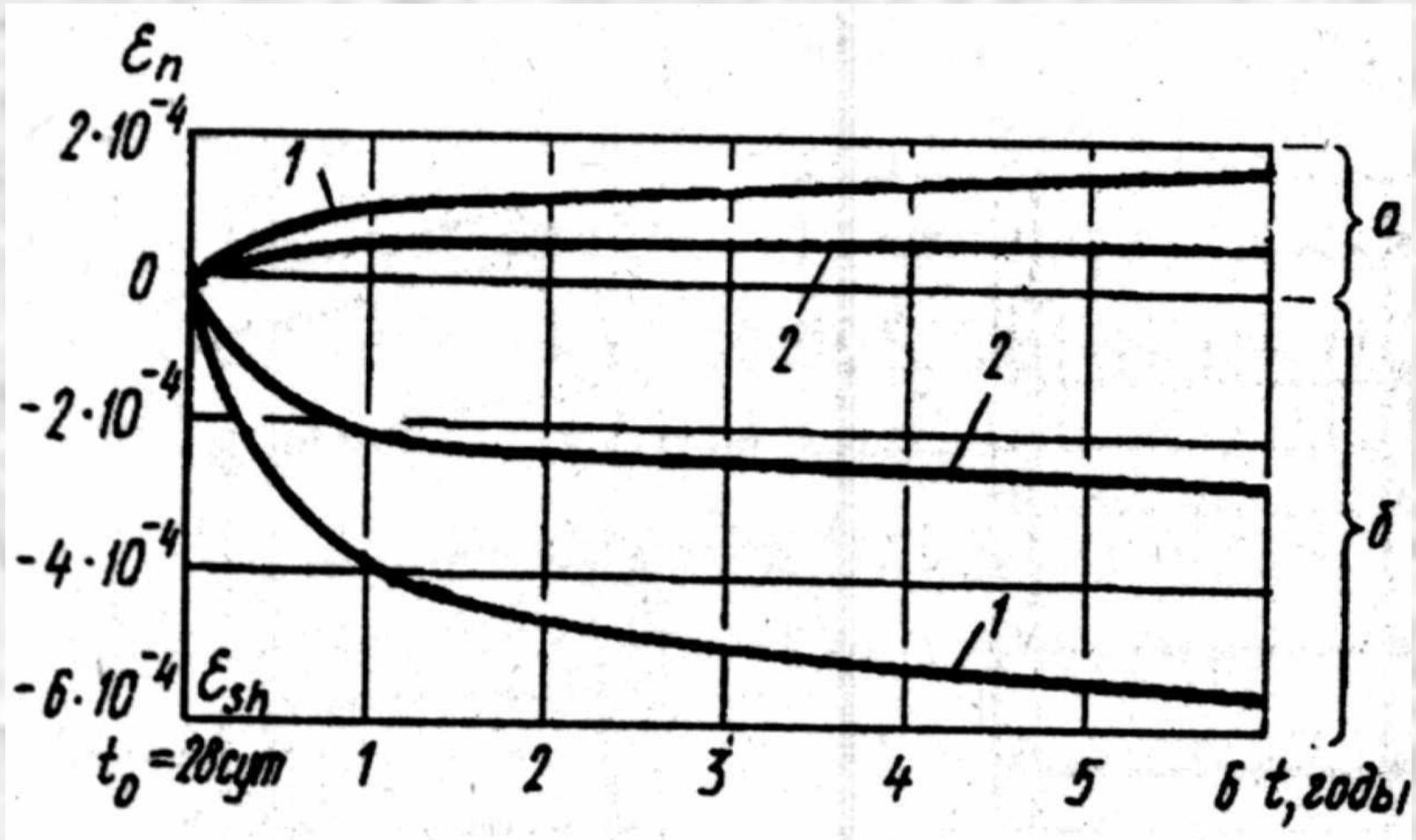
$\varepsilon_{sl} = 4,5 \times 10^{-4}$ (бетоны на пористых заполнителях)



1 — фрагмент бетонной балки; 2, 3 — продольные и поперечные усадочные трещины; 4 — наружный (высохший) слой; 5 — внутренний слой; 6 — растягивающие напряжения

Влажностные деформации

КРИВЫЕ УСАДКИ И НАБУХАНИЯ БЕТОННЫХ НЕАРМИРОВАННЫХ (1) И АРМИРОВАННЫХ (2) ОБРАЗЦОВ



а — набухание в воде; б — усадка на воздухе

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные деформации.

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные деформации.

Начальный коэффициент поперечных деформаций бетона $\nu = 0,2$ (коэффициент Пуассона).

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные деформации.

Начальный коэффициент поперечных деформаций бетона $\nu = 0,2$ (коэффициент Пуассона).

Бетону свойственно нелинейное деформирование.

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные деформации.

Начальный коэффициент поперечных деформаций бетона $\nu = 0,2$ (коэффициент Пуассона).

Бетону свойственно нелинейное деформирование.

- Длительном действии нагрузки;

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные деформации.

Начальный коэффициент поперечных деформаций бетона $\nu = 0,2$ (коэффициент Пуассона).

Бетону свойственно нелинейное деформирование.

- Длительном действии нагрузки;
- При однократном нагружении кратковременной нагрузкой;

Силовые деформации

Развиваются главным образом вдоль направления действия сил.

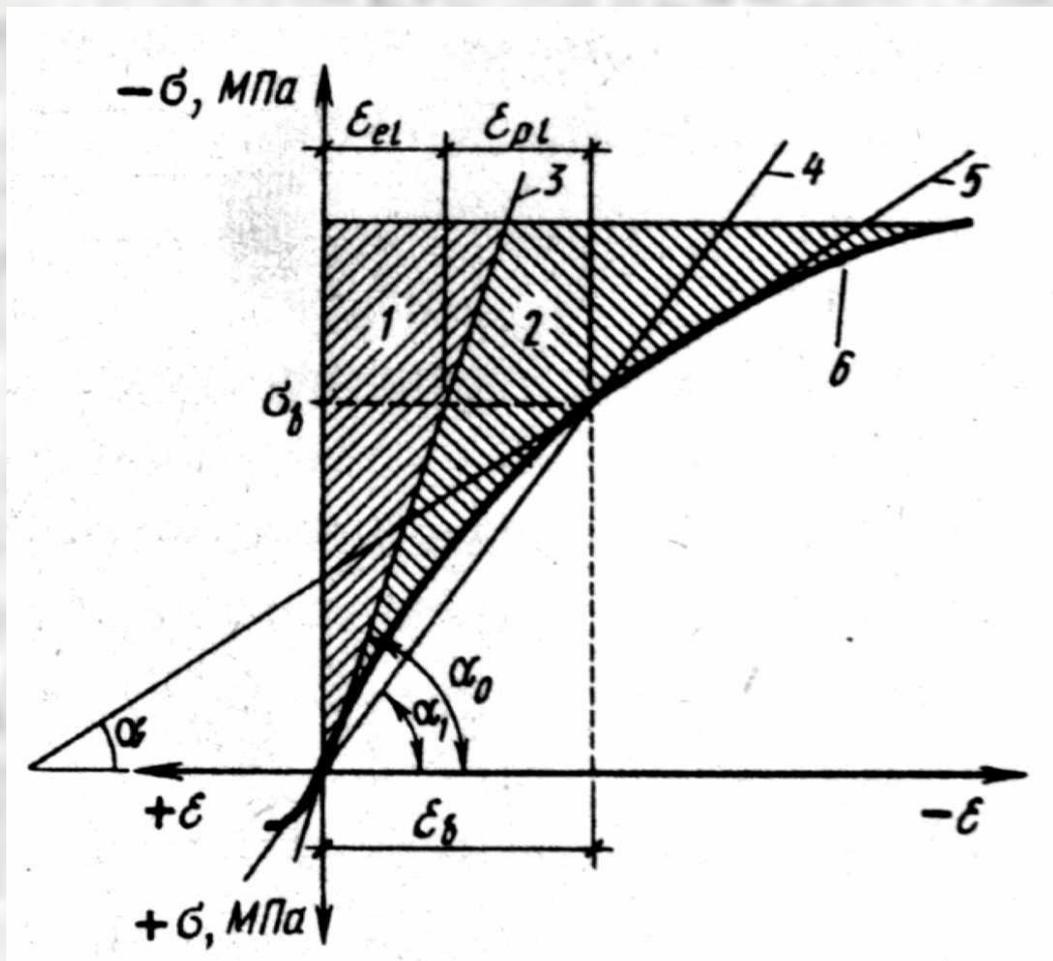
Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные деформации.

Начальный коэффициент поперечных деформаций бетона $\nu = 0,2$ (коэффициент Пуассона).

Бетону свойственно нелинейное деформирование.

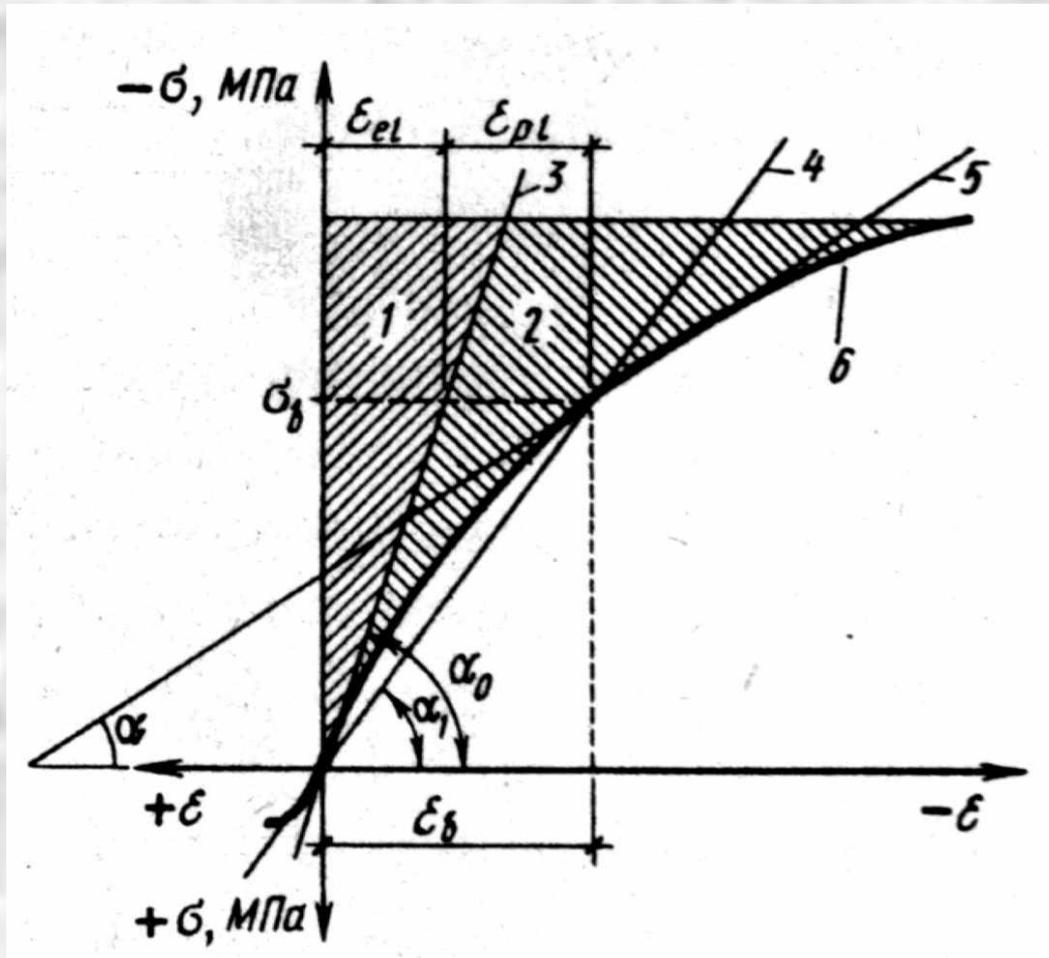
- Длительном действии нагрузки;
- При однократном нагружении кратковременной нагрузкой;
- Многократно повторяющимся действии нагрузки.

Деформации при однократном нагружении кратковременной нагрузкой



1 – область упругих деформаций; 2 – область пластических деформаций; 3 – граница упругих деформаций; 4 – секущая; 5 – касательная; 6 – кривая полных деформаций

Деформации при однократном нагружении кратковременной нагрузкой



Суммарные деформации :

$$\epsilon_b = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl},$$

где : ϵ_{el} – упругие деформации ;

ϵ_{pl} – пластические деформации ;

1 – область упругих деформаций; 2 – область пластических деформаций; 3 – граница упругих деформаций; 4 – секущая; 5 – касательная; 6 – кривая полных деформаций

Деформации при однократном нагружении кратковременной нагрузкой

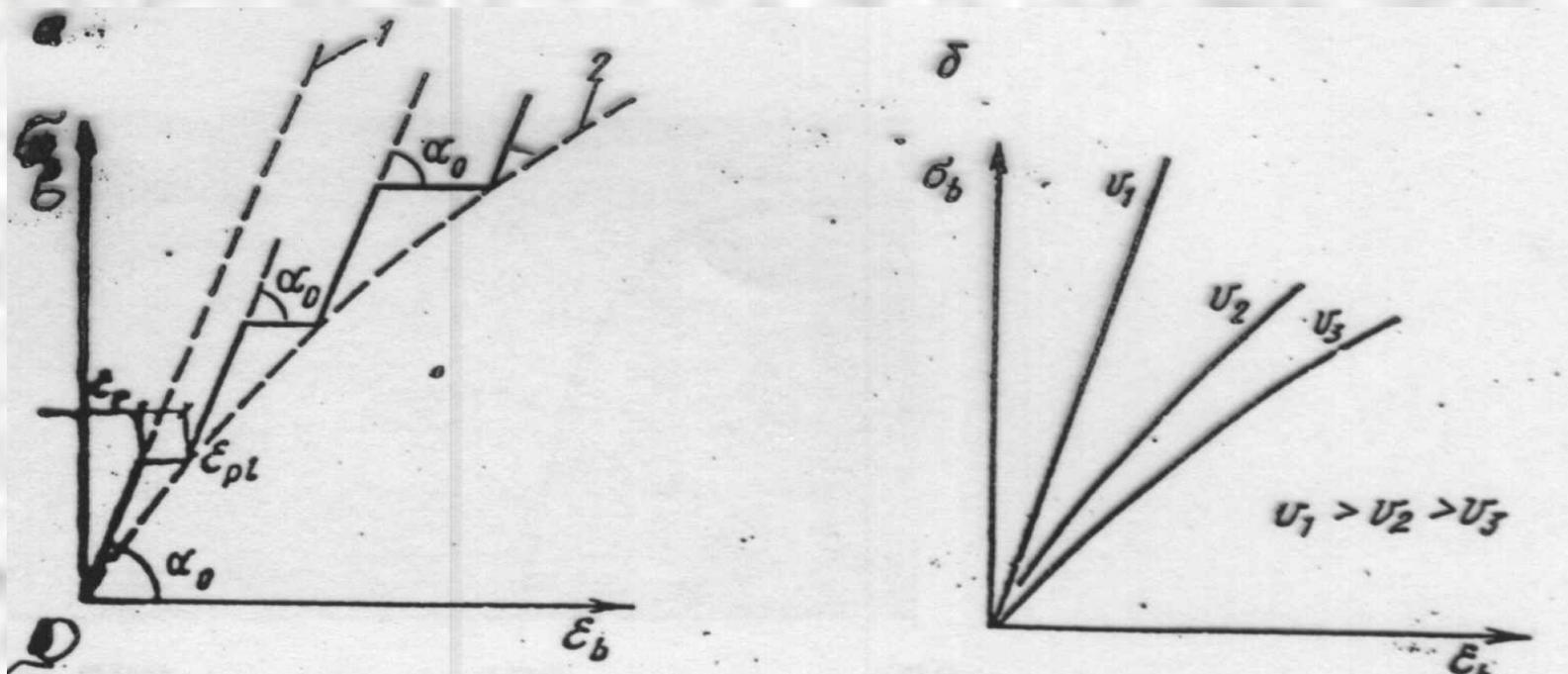
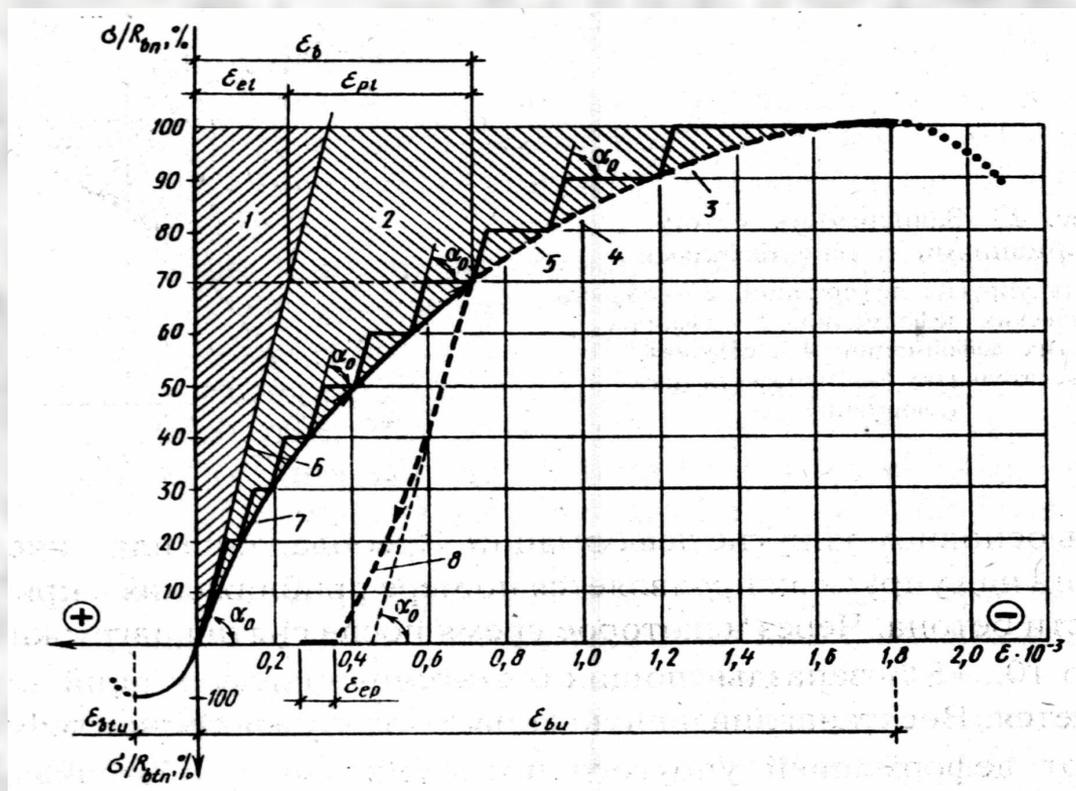


Диаграмма σ – ϵ в сжатом бетоне при различном числе этапов нагружения (а) и при различной скорости нагружения (б)

1 – область упругих деформаций; 2 – полные деформации;

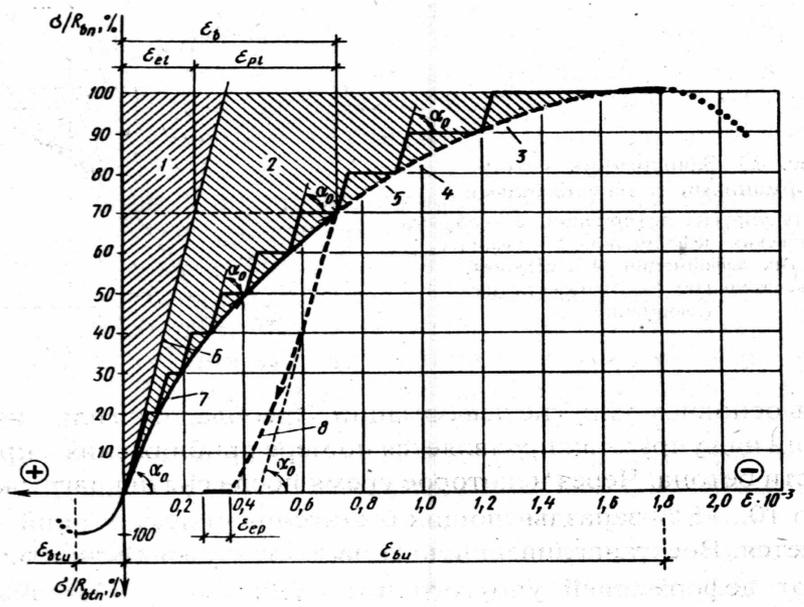
Деформации при однократном нагружении кратковременной нагрузкой



1 – область упругих деформаций; 2 – область пластических деформаций; 3, 7 – кривая полных деформаций; 4, 6 – прямые упругих деформаций; 5 – пластические деформации; 8 – кривая разгрузки;

ϵ_b – полные деформации; ϵ_{el} – упругие деформации; ϵ_{pl} – пластические деформации; ϵ_{ep} – деформация упругого последействия; ϵ_{bu} – предельная сжимаемость; ϵ_{btu} – предельная растяжимость

Деформации при однократном нагружении кратковременной нагрузкой



1 – область упругих деформаций; 2 – область пластических деформаций; 3, 7 – кривая полных деформаций; 4, 6 – прямые упругих деформаций; 5 – пластические деформации; 8 – кривая разгрузки; ϵ_b – полные деформации; ϵ_{el} – упругие деформации; ϵ_{pl} – пластические деформации; ϵ_{ep} – деформация упругого последействия; ϵ_{bu} – предельная сжимаемость; ϵ_{btu} – предельная растяжимость

Небольшая доля неупругих деформаций в течение некоторого времени после разгрузки восстанавливается (около 10%). Деформация упругого последействия – ϵ_{ep}

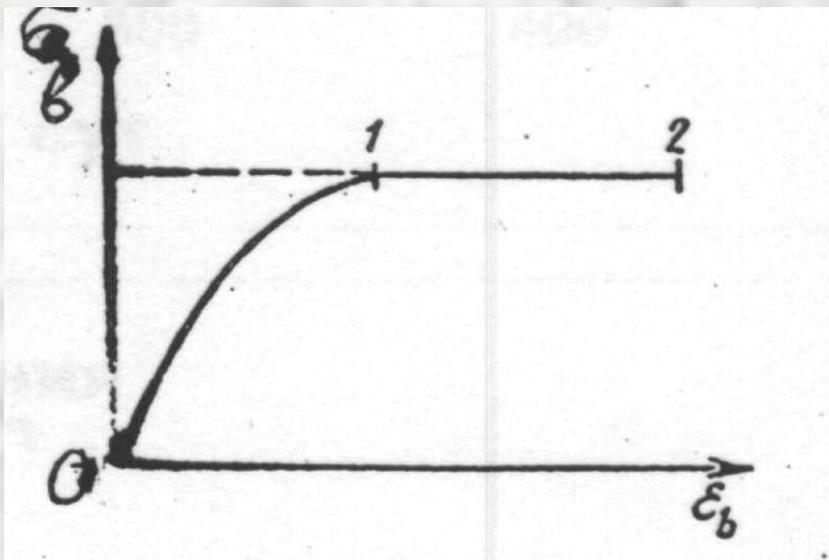
Деформации при длительном действии нагрузки

При длительном действии нагрузки неупругие деформации бетона с течением времени увеличиваются.

Деформации при длительном действии нагрузки

При длительном действии нагрузки неупругие деформации бетона с течением времени увеличиваются.

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E_b(\tau)} + C(t, \tau)$$



- 1 – упругие деформации;
- 2 – полные деформации

Деформации при длительном действии нагрузки

Свойства бетона, характеризующееся нарастанием неупругих деформаций во времени при постоянных напряжениях называется *ползучесть*.

Деформации при длительном действии нагрузки

Свойства бетона, характеризующееся нарастанием неупругих деформаций во времени при постоянных напряжениях называется *ползучесть*.

Наибольший рост деформаций происходит в течение первых 3...4 месяцев и может продолжаться в течение нескольких лет постепенно затухая в случае, если уровень нагружения образца меньше длительной прочности бетона (режим установившейся ползучести).

Деформации при длительном действии нагрузки

Свойства бетона, характеризующееся нарастанием неупругих деформаций во времени при постоянных напряжениях называется *ползучесть*.

Наибольший рост деформаций происходит в течение первых 3...4 месяцев и может продолжаться в течение нескольких лет постепенно затухая в случае, если уровень нагружения образца меньше длительной прочности бетона (режим установившейся ползучести).

Если напряжения в бетоне превышают предел его длительной прочности, то после некоторой стабилизации деформаций происходит их неограниченный рост и образец разрушается.

Деформации при длительном действии нагрузки

Свойства бетона, характеризующееся нарастанием неупругих деформаций во времени при постоянных напряжениях называется *ползучесть*.

Наибольший рост деформаций происходит в течение первых 3...4 месяцев и может продолжаться в течение нескольких лет постепенно затухая в случае, если уровень нагружения образца меньше длительной прочности бетона (режим установившейся ползучести).

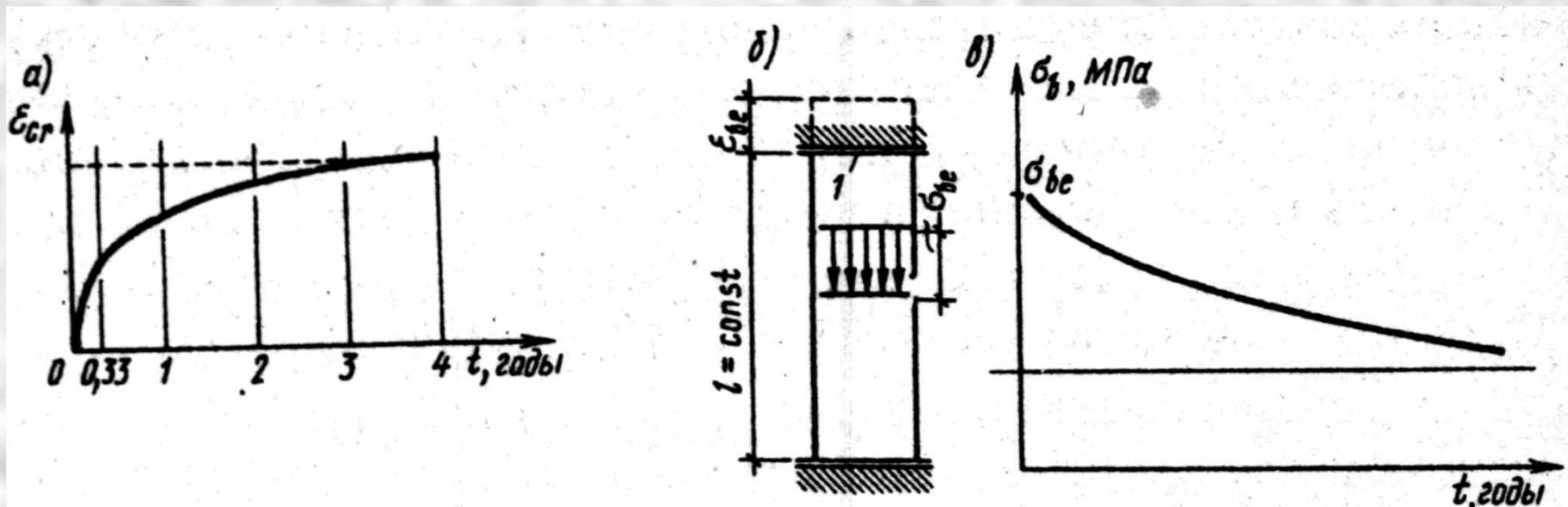
Если напряжения в бетоне превышают предел его длительной прочности, то после некоторой стабилизации деформаций происходит их неограниченный рост и образец разрушается.

Релаксацией называется уменьшение напряжений при постоянных деформациях.

Деформации при длительном действии нагрузки

Если напряжения в бетоне превышают предел его длительной прочности, то после некоторой стабилизации деформаций происходит их неограниченный рост и образец разрушается.

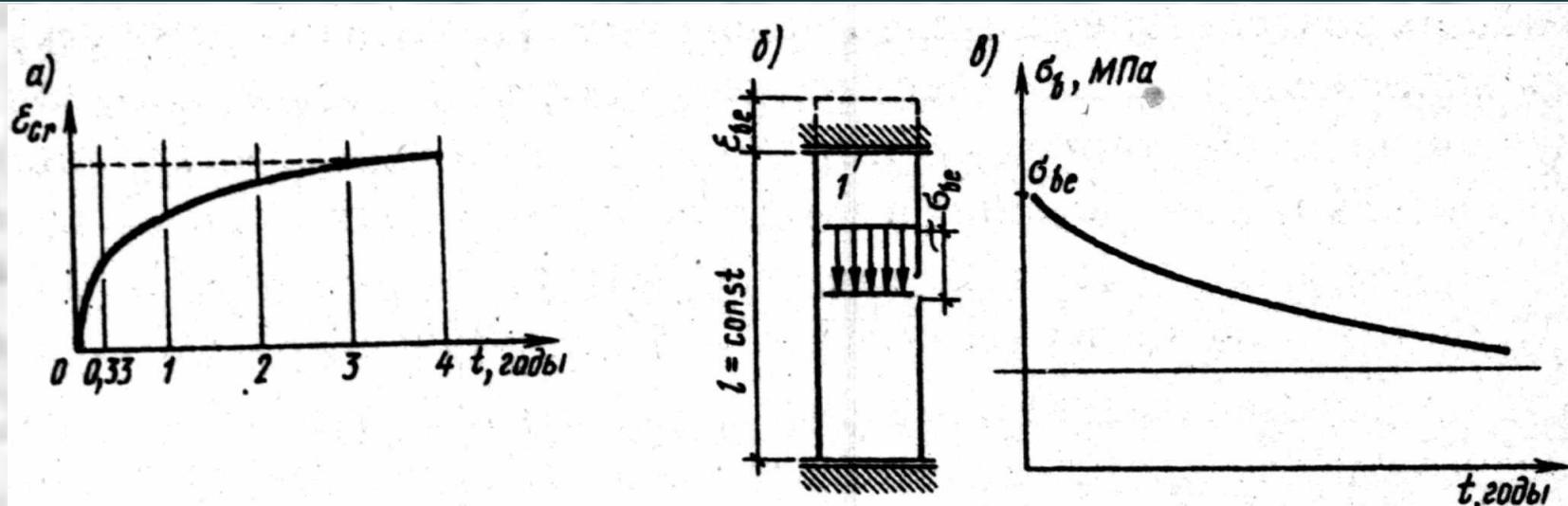
Релаксацией называется уменьшение напряжений при постоянных деформациях.



Деформативность бетона:

а – рост деформаций ползучести во времени; б, в – снижение напряжений с течением времени; 1 - связи

Деформации при длительном действии нагрузки

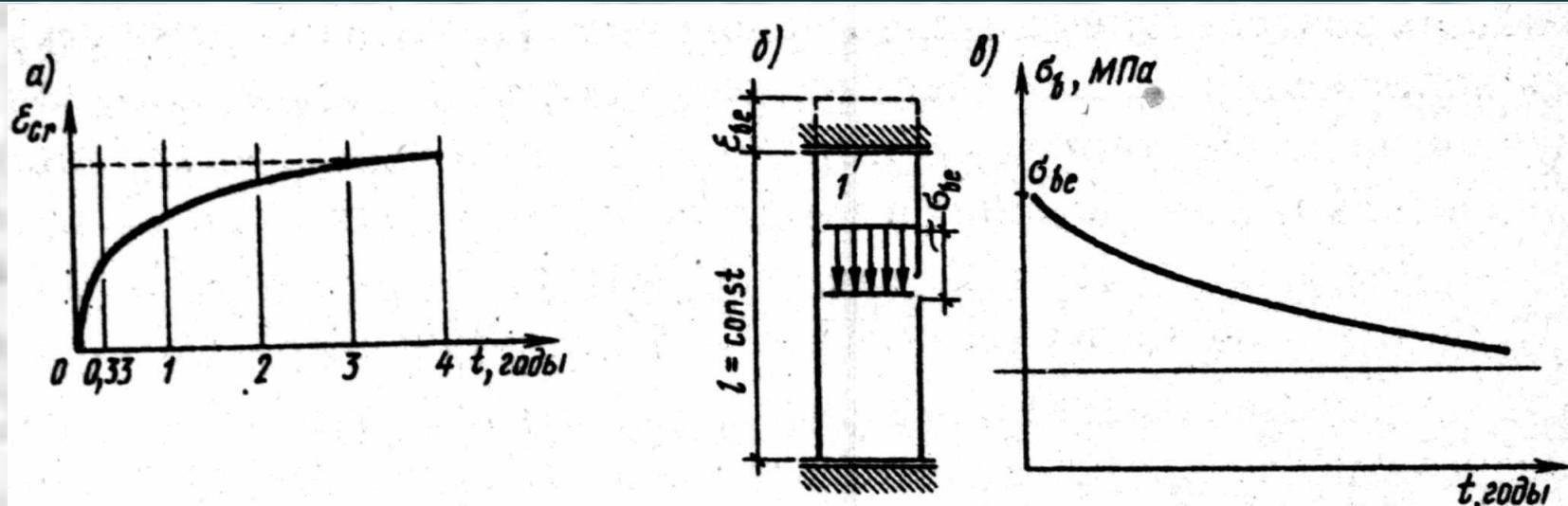


Деформативность бетона:

а – рост деформаций ползучести во времени; б, в – снижение напряжений с течением времени; 1 - связи

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

Деформации при длительном действии нагрузки



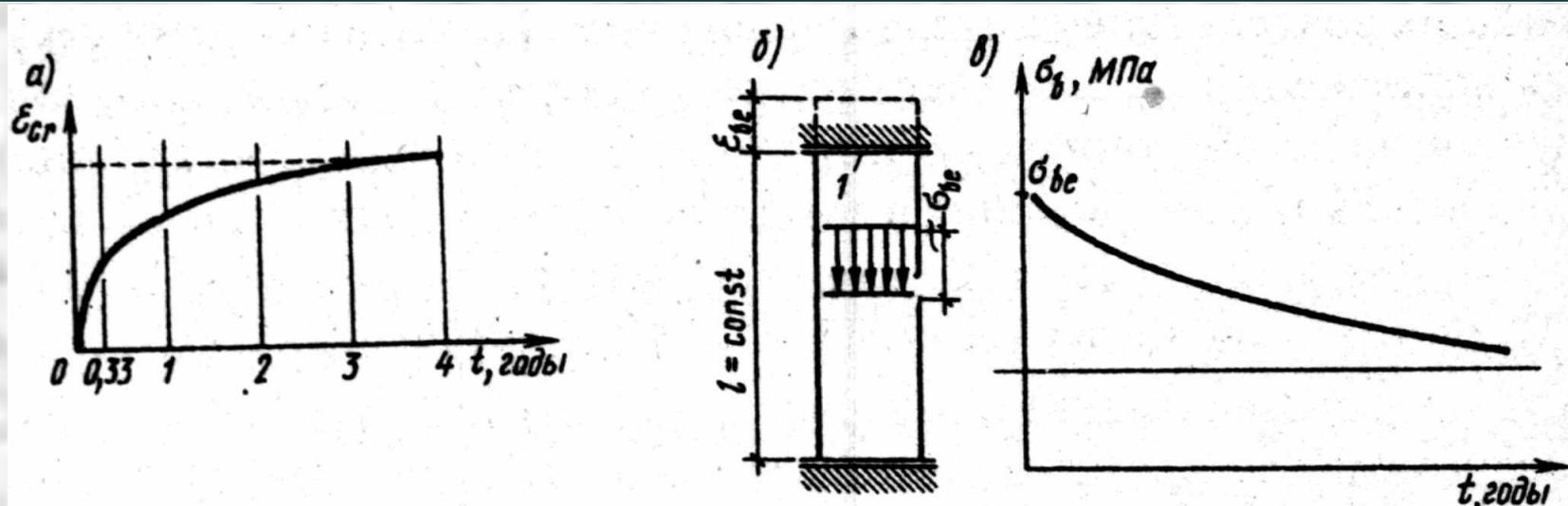
Деформативность бетона:

а – рост деформаций ползучести во времени; б, в – снижение напряжений с течением времени; 1 - связи

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Деформации при длительном действии нагрузки



Деформативность бетона:

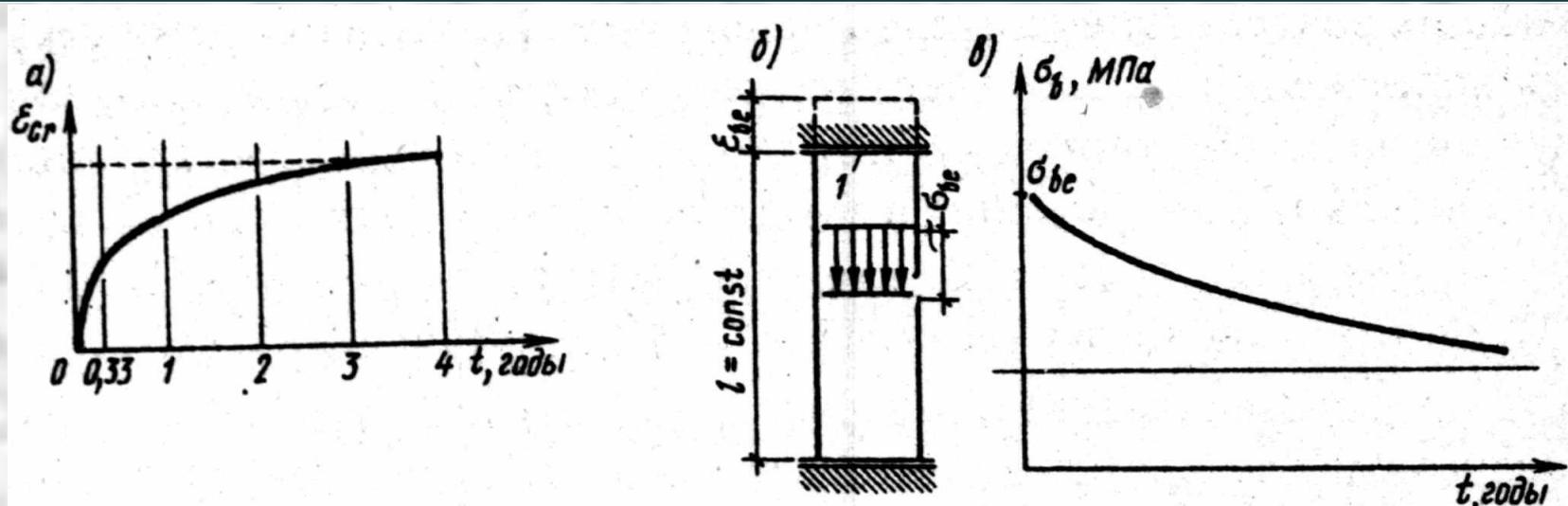
а – рост деформаций ползучести во времени; б, в – снижение напряжений с течением времени; 1 - связи

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Деформации при длительном действии нагрузки



Деформативность бетона:

а – рост деформаций ползучести во времени; б, в – снижение напряжений с течением времени; 1 - связи

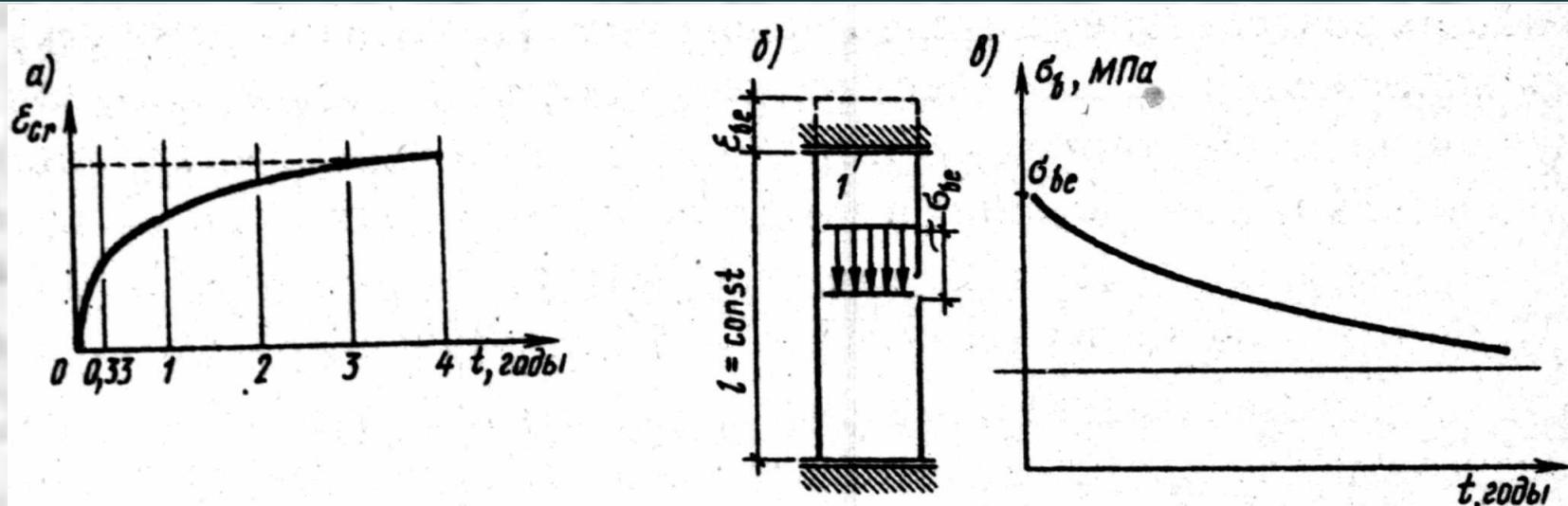
Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Ползучесть условно разделяют на линейную и нелинейную составляющие.

Деформации при длительном действии нагрузки



Деформативность бетона:

а – рост деформаций ползучести во времени; б, в – снижение напряжений с течением времени; 1 - связи

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня. В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Ползучесть условно разделяют на линейную и нелинейную составляющие.

При линейной ползучести деформации ползучести прямо пропорциональны напряжениям.

Деформации при длительном действии нагрузки

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Ползучесть условно разделяют на линейную и нелинейную составляющие.

При линейной ползучести деформации ползучести прямо пропорциональны напряжениям.

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

Деформации при длительном действии нагрузки

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Ползучесть условно разделяют на линейную и нелинейную составляющие.

При линейной ползучести деформации ползучести прямо пропорциональны напряжениям.

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;

Деформации при длительном действии нагрузки

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Ползучесть условно разделяют на линейную и нелинейную составляющие.

При линейной ползучести деформации ползучести прямо пропорциональны напряжениям.

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;
- возраст бетона к моменту нагружения;

Деформации при длительном действии нагрузки

Природа ползучести бетона объясняется его структурой, длительным процессом кристаллизации и уменьшением цементного геля при твердении цементного камня.

В результате действия нагрузки происходит вязкое течение глеевой структурной составляющей и перераспределение напряжений на кристаллический сросток и зерна заполнителей.

Одновременно происходят перемещение избыточной воды в микропорах и капиллярах.

Ползучесть условно разделяют на линейную и нелинейную составляющие.

При линейной ползучести деформации ползучести прямо пропорциональны напряжениям.

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;
- возраст бетона к моменту нагружения;
- влажность среды (в сухой среде ползучесть выше);
- повышение температуры приводит к росту деформаций ползучести, а при отрицательных температурах ползучесть практически прекращается.

Деформации при длительном действии нагрузки

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;
- возраст бетона к моменту нагружения;
- влажность среды (в сухой среде ползучесть выше);
- повышение температуры приводит к росту деформаций ползучести, а при отрицательных температурах ползучесть практически прекращается;

Технологические факторы:

- ✓ **W/C** отношение (с увеличением **W/C** ползучесть возрастает);

Деформации при длительном действии нагрузки

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;
- возраст бетона к моменту нагружения;
- влажность среды (в сухой среде ползучесть выше);
- повышение температуры приводит к росту деформаций ползучести, а при отрицательных температурах ползучесть практически прекращается;

□ Технологические факторы:

- ✓ **W/C** отношение (с увеличением **W/C** ползучесть возрастает);
- ✓ С увеличением цемента на единицу объема ползучесть возрастает;

Деформации при длительном действии нагрузки

Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;
- возраст бетона к моменту нагружения;
- влажность среды (в сухой среде ползучесть выше);
- повышение температуры приводит к росту деформаций ползучести, а при отрицательных температурах ползучесть практически прекращается;

□ Технологические факторы:

- ✓ **W/C** отношение (с увеличением **W/C** ползучесть возрастает);
- ✓ С увеличением цемента на единицу объема ползучесть возрастает;
- ✓ Повышение прочности заполнителя и марки бетона уменьшает ползучесть;

Деформации при длительном действии нагрузки

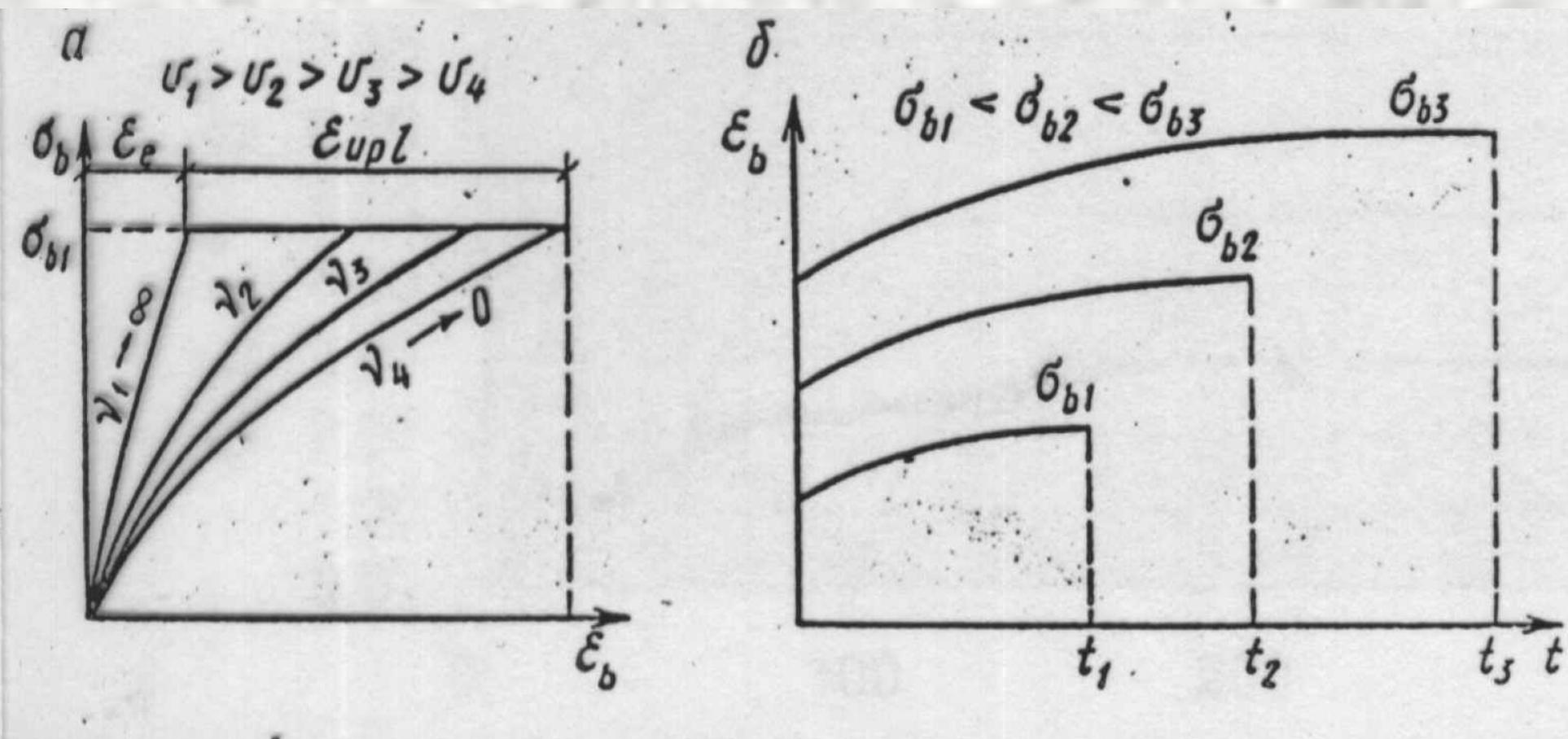
Факторы, влияющие на ползучесть бетона:

- уровень нагружения;
- возраст бетона к моменту нагружения;
- влажность среды (в сухой среде ползучесть выше);
- повышение температуры приводит к росту деформаций ползучести, а при отрицательных температурах ползучесть практически прекращается;

□ Технологические факторы:

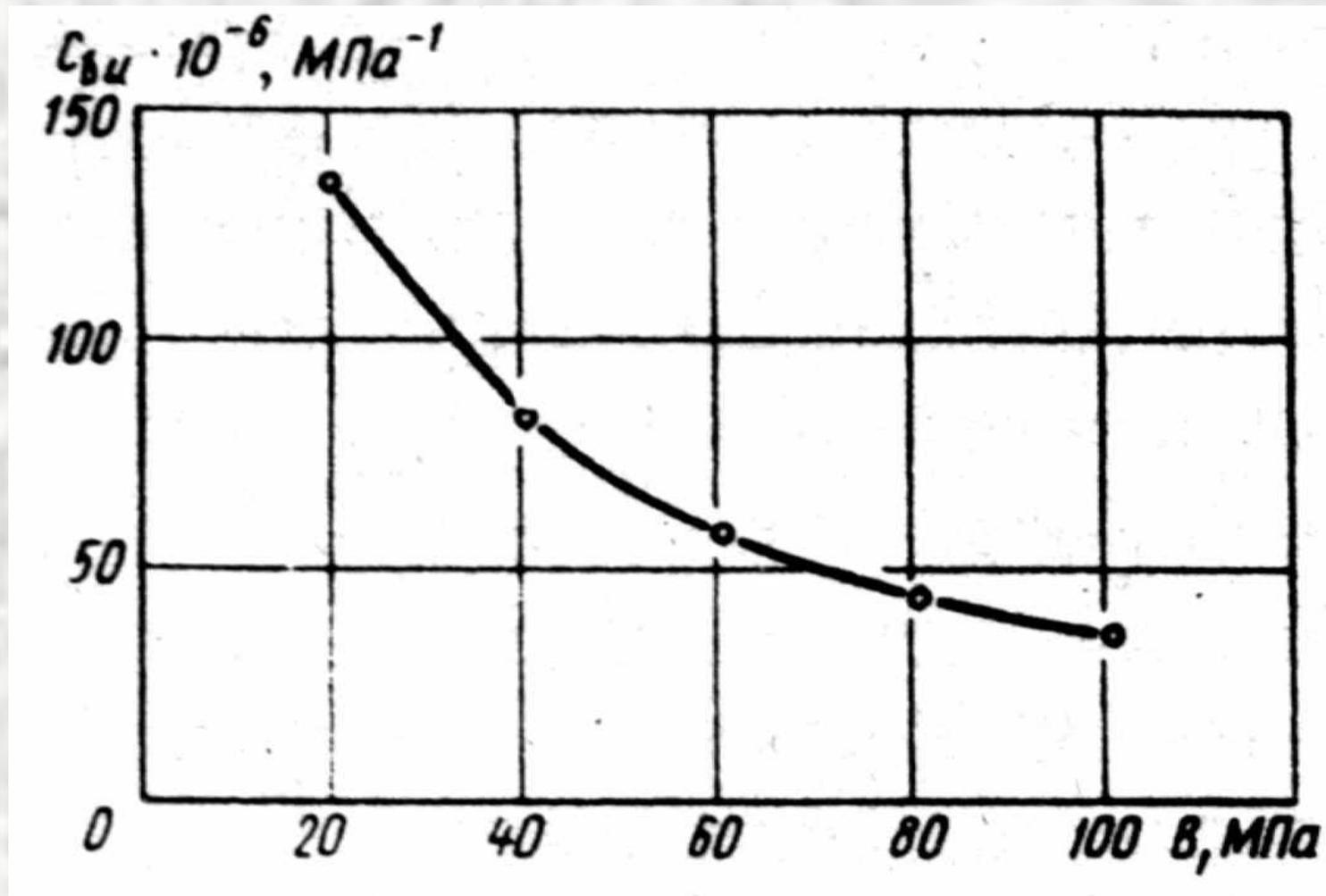
- ✓ **W/C** отношение (с увеличением **W/C** ползучесть возрастает);
- ✓ С увеличением цемента на единицу объема ползучесть возрастает;
- ✓ Повышение прочности заполнителя и марки бетона уменьшает ползучесть;
- ✓ Бетоны на пористых заполнителях обладают большей ползучестью.

Деформации при длительном действии нагрузки



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

Деформации при длительном действии нагрузки



Осредненная зависимость меры ползучести от класса бетона при напряжениях в образцах $0,5 R_b$

Деформации при длительном действии нагрузки

Мера ползучести – функция, описывающая развитие удельных деформаций ползучести во времени.

Часто меру ползучести представляют как произведение двух функций: функции старения и функции роста деформаций ползучести во времени:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \cdot f(t - \tau);$$

$\varphi(\tau)$ – функция старения;

$f(t - \tau)$ – функция роста деформаций ползучести.

Теории ползучести бетона

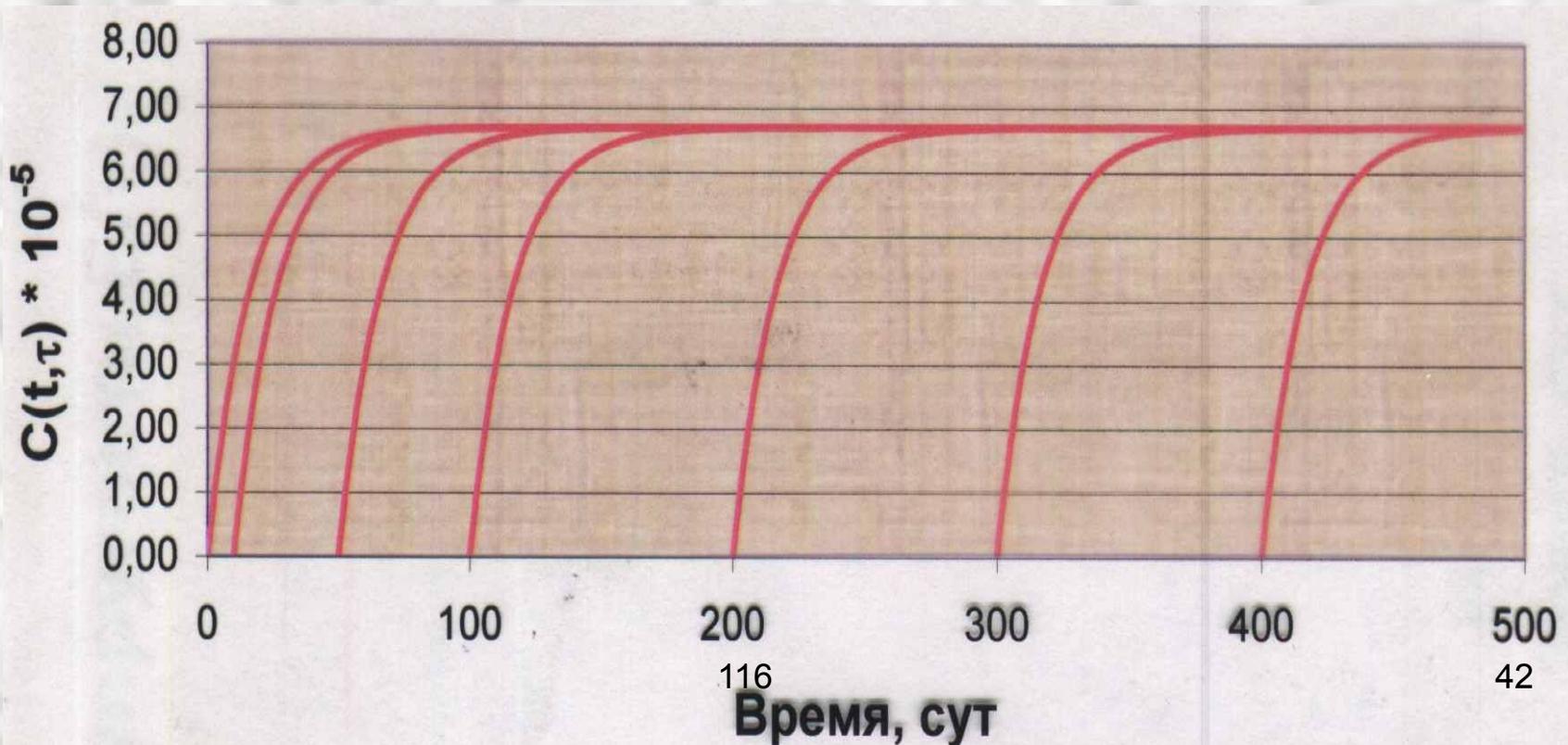
- Теория упругой наследственности (Больцман, Вольтера, Работнов, Ржаницын, Харлаб);

Теории ползучести бетона

- Теория упругой наследственности (Больцман, Вольтера, Работнов, Ржаницын, Харлаб);

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \cdot f(t - \tau);$$

$$\varphi(\tau) = C_0; \quad f(t - \tau) = 1 - e^{-\gamma(t - \tau)}$$



Теории ползучести бетона

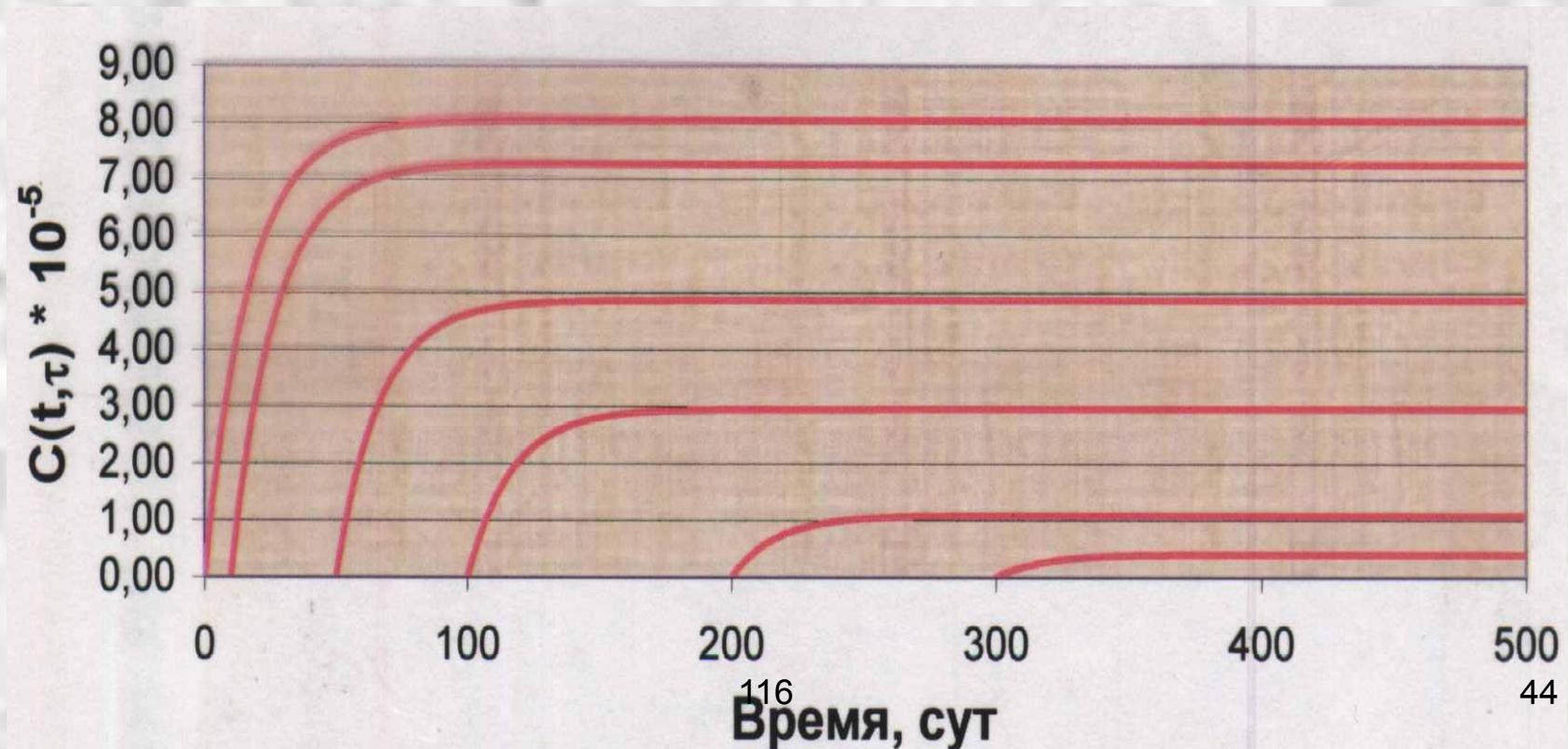
- Теория старения (Уитней, Дишингер Столяров, Улицкий, Гибшман, Гольшев);

Теории ползучести бетона

- Теория старения (Уитней, Дишингер Столяров, Улицкий, Гибшман, Гольшев);

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \cdot f(t - \tau);$$

$$\varphi(\tau) = C_m e^{-\alpha\tau}; \quad f(t - \tau) = 1 - e^{-\gamma(t-\tau)}$$



Теории ползучести бетона

- Теория старения (Уитней, Дишингер Столяров, Улицкий, Гибшман, Гольшев);
 - ✓ 1-й вариант модифицированной теории старения;
 - ✓ 2-й вариант модифицированной теории старения;

Теории ползучести бетона

- Теория упруго-ползучего тела или наследственная теория старения Маслова-Арутюняна

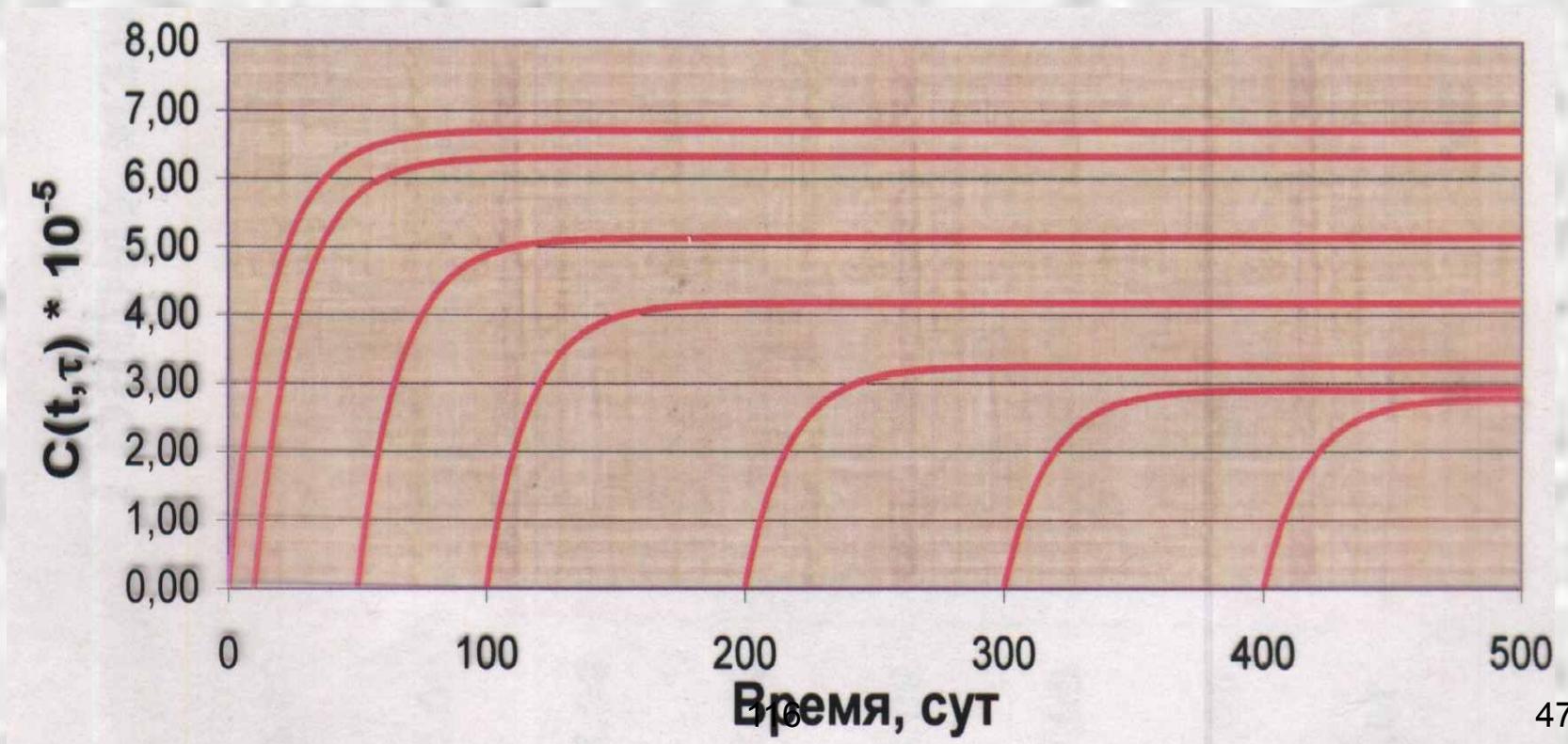
$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \cdot f(t - \tau);$$

$$\varphi(\tau) = (C_0 + C_m e^{-\alpha\tau}); \quad f(t - \tau) = 1 - e^{-\gamma(t-\tau)}$$

Теории ползучести бетона

- Теория упруго-ползучего тела или наследственная теория старения Маслова-Арутюняна

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \cdot f(t - \tau);$$
$$\varphi(\tau) = (C_0 + C_m e^{-\alpha\tau}); \quad f(t - \tau) = 1 - e^{-\gamma(t - \tau)}$$



Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

Многократное повторение циклов загрузки-разгрузки бетона приводит к постепенному накоплению неупругих деформаций.

Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

Многократное повторение циклов загрузки-разгрузки бетона приводит к постепенному накоплению неупругих деформаций.

Постепенно после большого количества циклов неупругие деформации соответствующие данному уровню нагружения (при $\sigma_b \leq R_r$) выбираются, и бетон начинает работать упруго.

Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

Многократное повторение циклов загрузки-разгрузки бетона приводит к постепенному накоплению неупругих деформаций.

Постепенно после большого количества циклов неупругие деформации соответствующие данному уровню нагружения (при $\sigma_b \leq R_r$) выбираются, и бетон начинает работать упруго.

При $\sigma_b > R_r$ после некоторого числа циклов нагружения неупругие деформации начинают неограниченно расти, кривизна линии $\sigma_b - \varepsilon_b$ меняет знак, угол наклона к оси абсцисс последовательно уменьшается и происходит разрушение образца.

Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

Многократное повторение циклов загрузки-разгрузки бетона приводит к постепенному накоплению неупругих деформаций.

Постепенно после большого количества циклов неупругие деформации соответствующие данному уровню нагружения (при $\sigma_b \leq R_r$) выбираются, и бетон начинает работать упруго.

При $\sigma_b > R_r$ после некоторого числа циклов нагружения неупругие деформации начинают неограниченно расти, кривизна линии $\sigma_b - \varepsilon_b$ меняет знак, угол наклона к оси абсцисс последовательно уменьшается и происходит разрушение образца.

При вибрационных нагрузках большой частотой (**200...600** повторений в минуту) наблюдается ускоренное развитие ползучести бетона (виброползучесть или динамическая ползучесть).

Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки

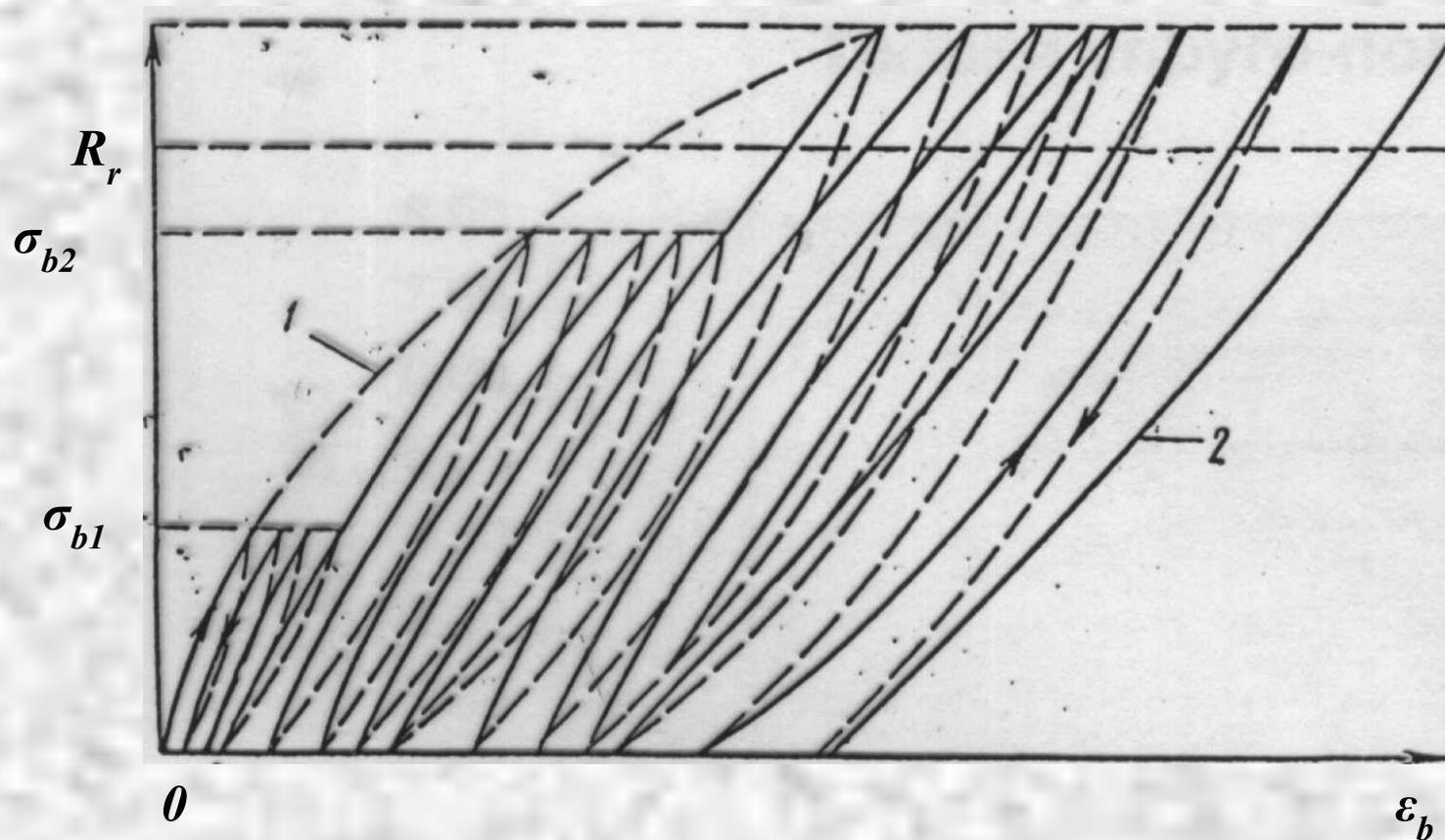
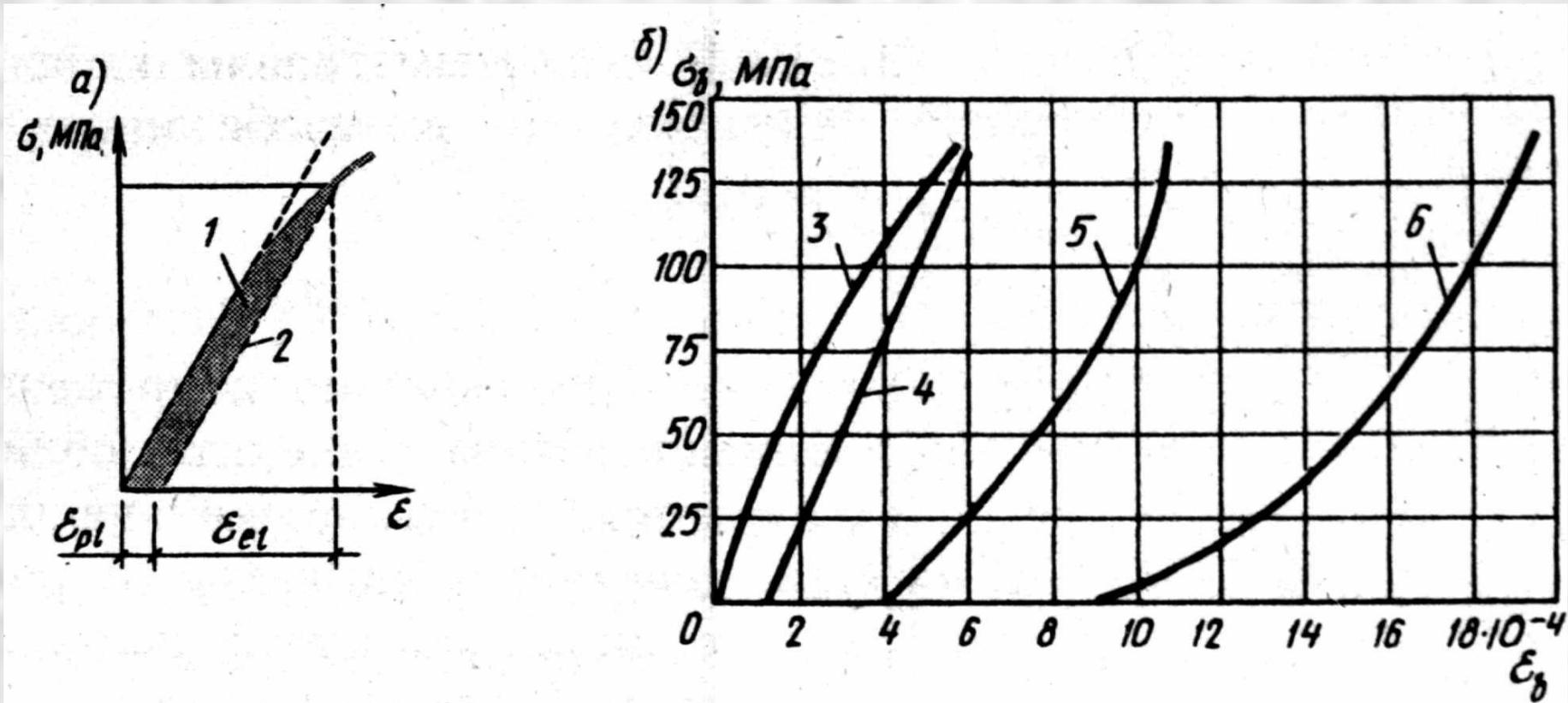


Диаграмма $\sigma_b - \varepsilon_b$ в сжатом бетоне при многократном повторном нагружении бетонного образца: 1 – первичная кривая; 2 – конечная кривая

Деформация бетона при многократно повторяющемся действии нагрузки



Зависимость $\sigma_b - \epsilon_b$ в сжатом бетоне при повторных нагружениях:

а – один цикл нагрузка; б – многократное повторение циклов при $\sigma > R_f$; 1 – нагрузка; 2 – разгрузка; 3 – первичное нагружение; 4 – 675 циклов; 5 – $10,5 \cdot 10^4$; 6 – $34,1 \cdot 10^4$ цикла