

Элементарные расчеты параметров клееных конструкций

Клееные балки

- **Клееные балки из досок и фанеры, склеенные синтетическим клеем, являются основным видом составных балок заводского изготовления.**
- **Размеры и форма сечений составных клееных балок может быть практически любой не зависимо от сортамента пиломатериалов и фанеры.**
- **Клееная древесина и фанера дольше сопротивляются загниванию и имеют более высокий предел огнестойкости, чем цельная древесина.**
- **Жесткие и стойкие против увлажнения клеевые соединения обеспечивают монолитность балок.**

Существующие виды клееных балок можно разделить на две основные группы:

1) дощатоклееные балки, состоящие из склеенных между собой досок;

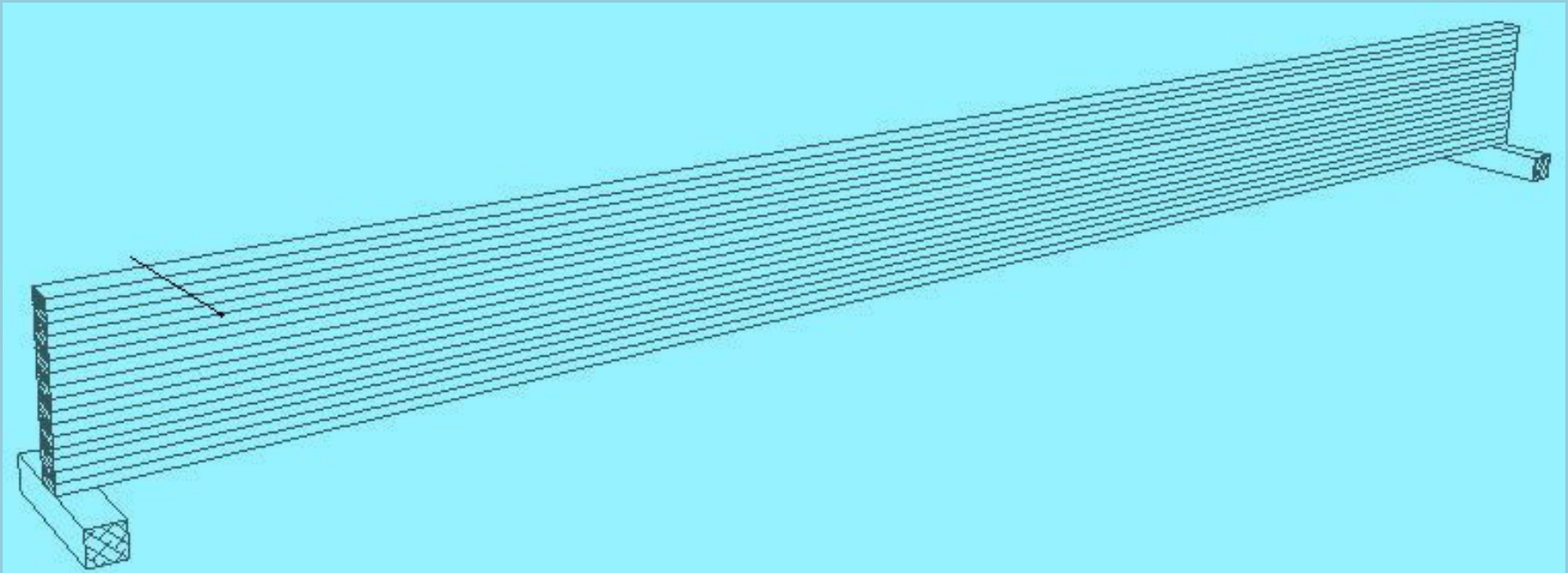
2) клеефанерные балки, состоящие из дощатых поясов и приклеенных к ним стенок из водостойкой фанеры.

Дощатоклеенные балки
применяют,
главным образом, в качестве
основных несущих конструкций
покрытия сельских,
общественных и промышленных
зданий,
используют их также в виде прогонов,
пролеты и нагрузки которых не
позволяют применять прогоны
цельного сечения,
а также в виде главных балок
перекрытий, мостов и других
сооружений

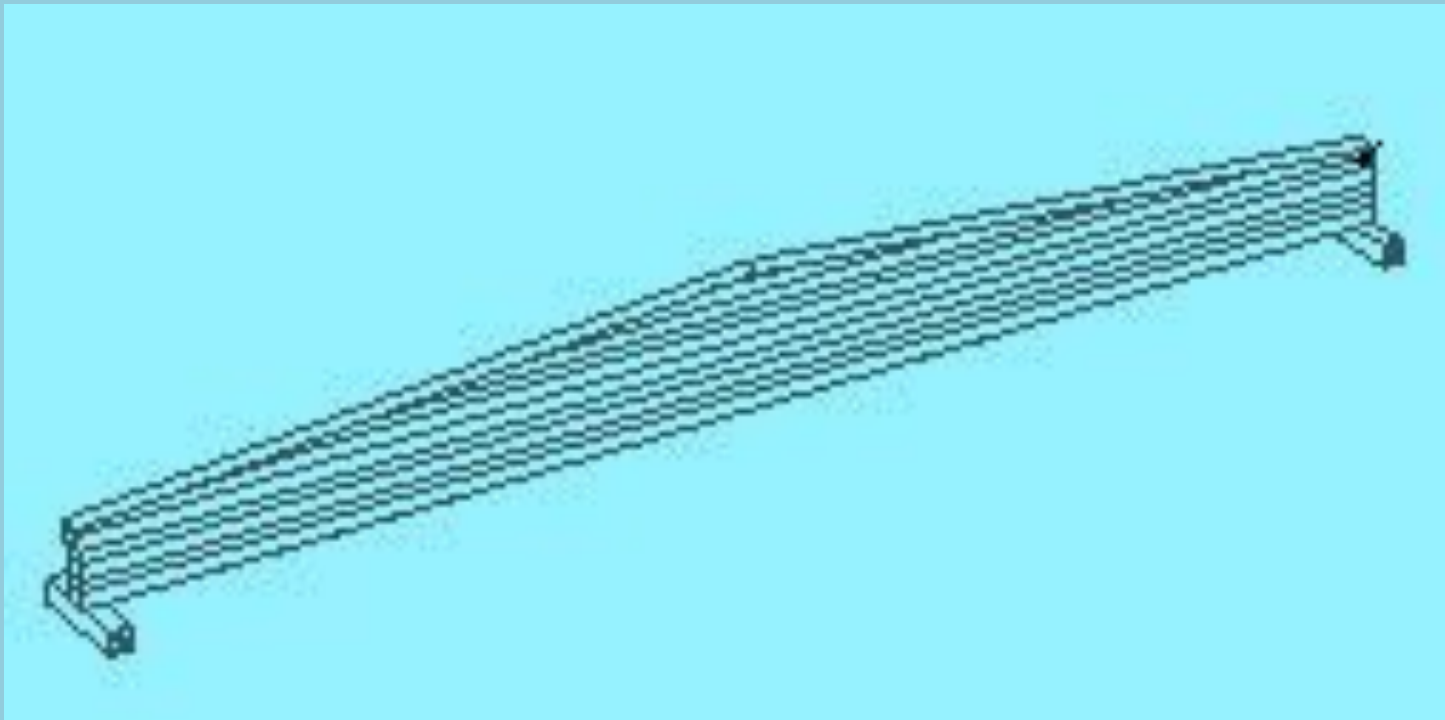
- **В отечественной практике строительства дощатоклееные балки находят применение в покрытиях пролетом до 18 м.**
- **За рубежом имеются примеры эффективного применения дощатоклееных балок в покрытиях пролетом до 30 м и более.**

Дощатоклеенные балки могут быть:

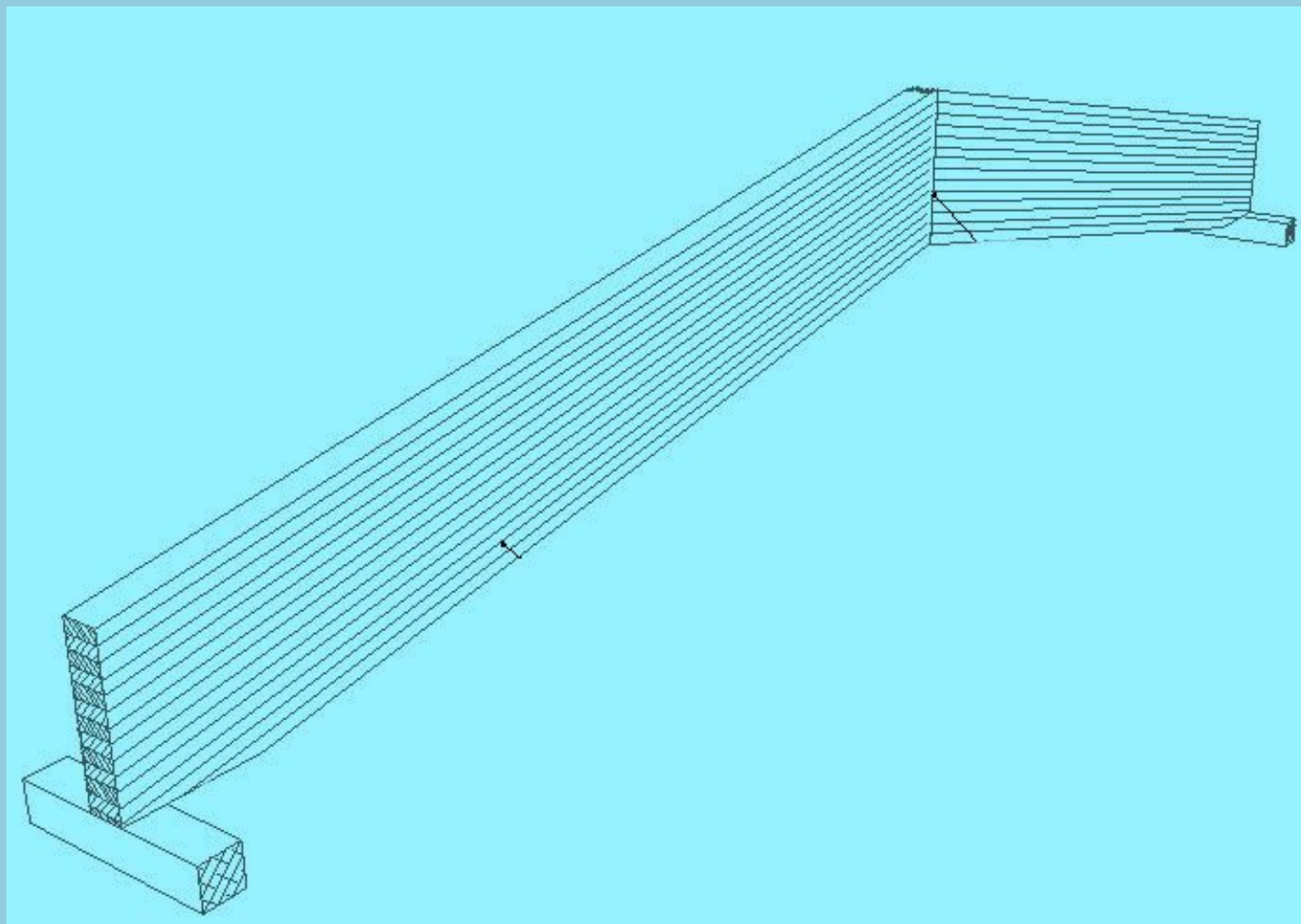
1) односкатными постоянной высоты;



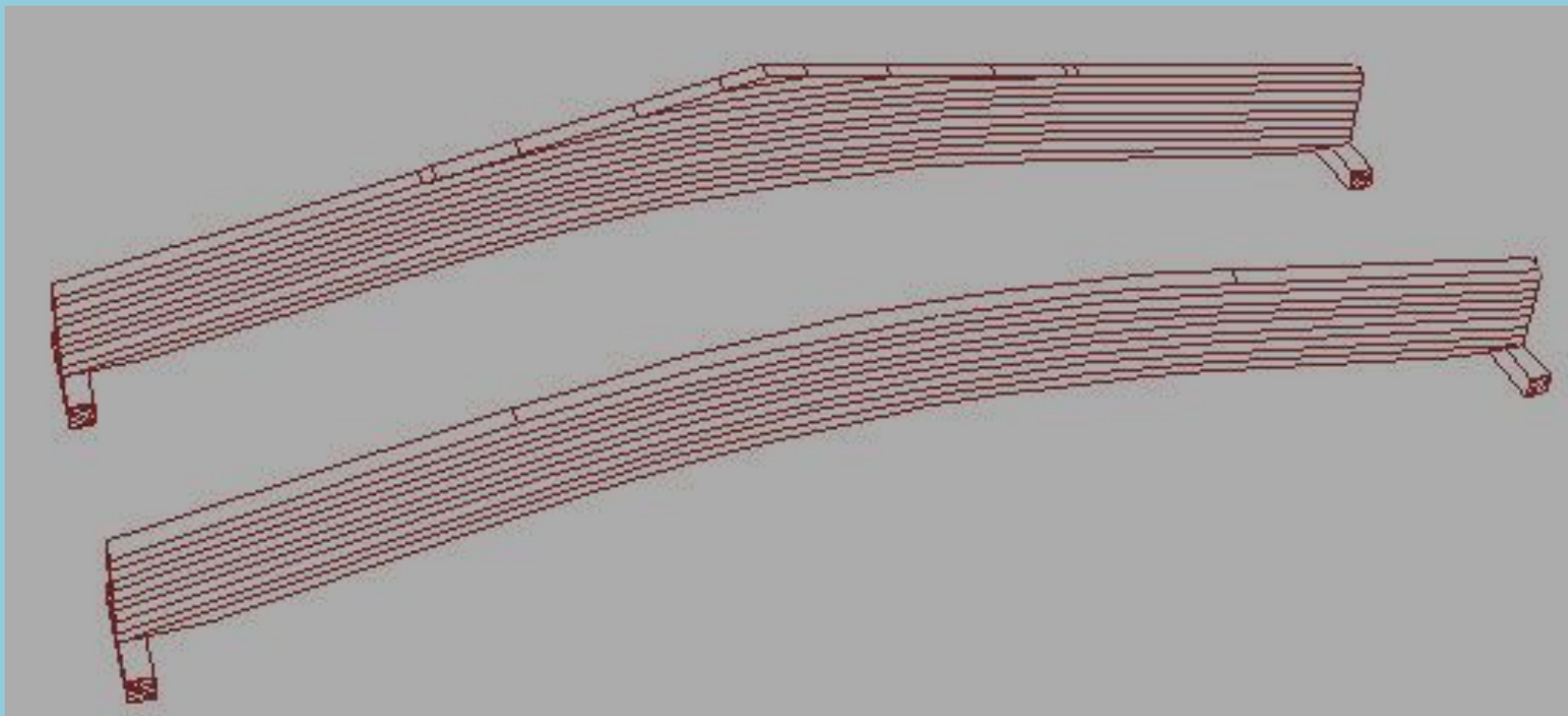
**2) двускатными переменного сечения,
причем h_0 не менее $0.4h$, где h_0 – высота
балки у опоры, h – высота в середине
пролета**



**3) ломаными, состоящими из двух
прямолинейных элементов, соединенных в
коньке зубчатым соединением**



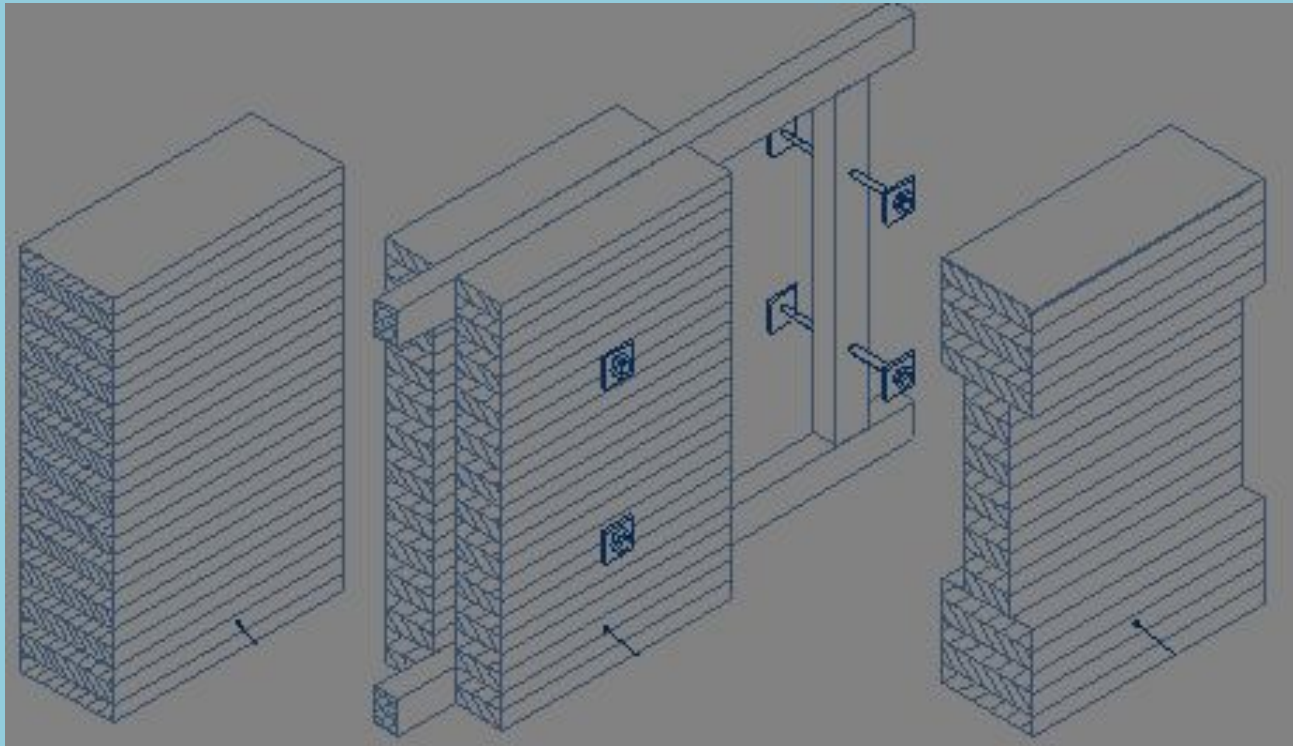
4) ГНУТЫМИ



- Балки склеиваются из досок толщиной не более 42 мм (для гнутоклееных – не более 33 мм).
- Сечения дощатоклееных балок принимают в большинстве случаев шириной не более 17 см, что позволяет изготавливать их из цельных по ширине досок.

- Балки большей ширины изготавливают из менее широких досок, склеенных между собой кромками с расположением стыков вразбежку, что увеличивает трудоемкость их изготовления.
- Формы поперечных сечений балок могут быть весьма разнообразными.
- Традиционными формами сечения являются прямоугольное массивное, реже двутавровое или тавровое (т.к.они не технологичны в изготовлении).

Виды сечений дощатоклеенных балок



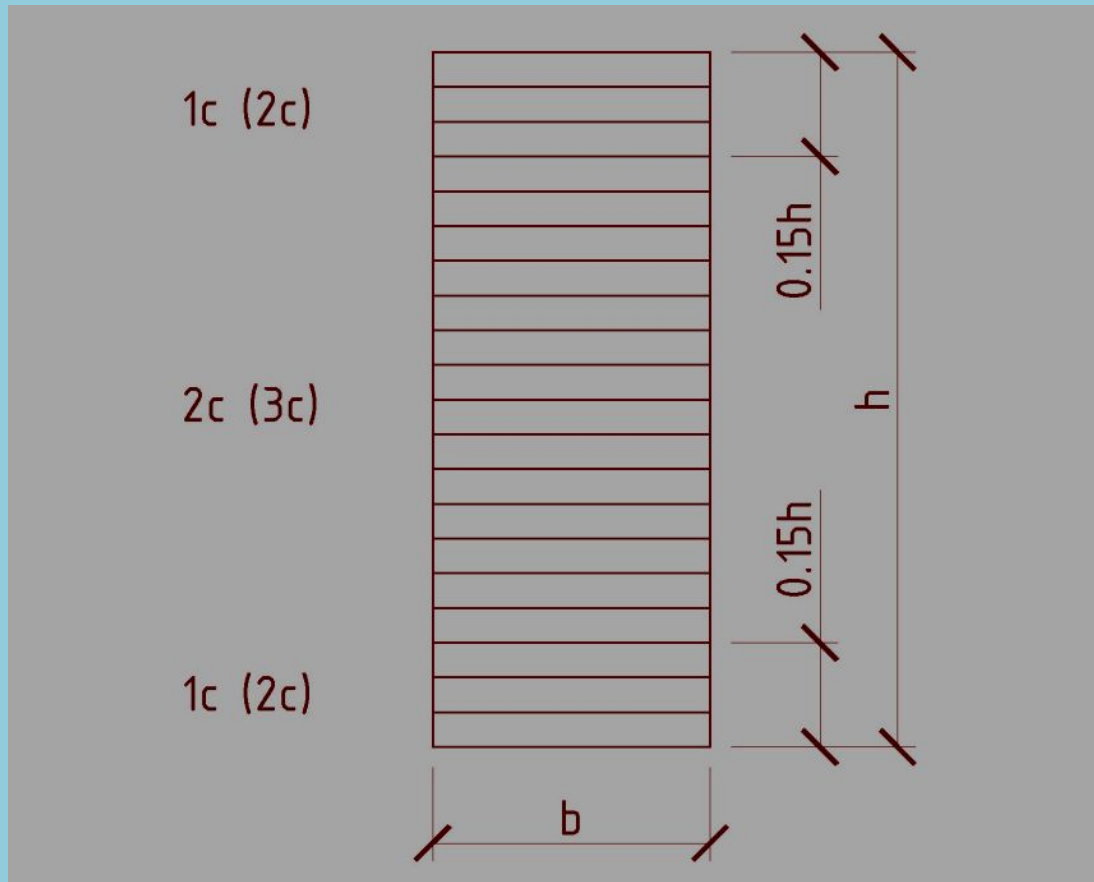
- **Высота балок (h) принимается в пределах $h=(1/8...1/12)l$.**

Для обеспечения устойчивости балок отношение высоты балки h к ширине b не должно быть больше 6 ($h/b \leq 6$).

- **Дощатоклеенные балки с большим отношением высоты к ширине поперечного сечения подлежат проверке на общую устойчивость.**

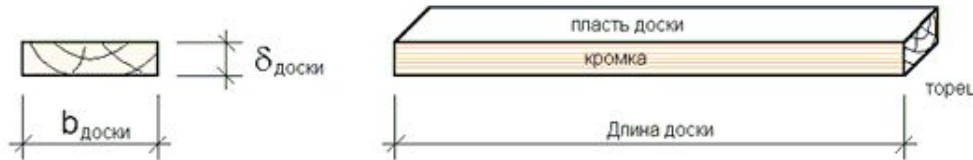
- **Доски располагаются по высоте сечения балок таким образом, чтобы древесина наиболее высокого качества размещалась в наиболее напряженных нижней и верхней зонах.**

Расположение досок в балке

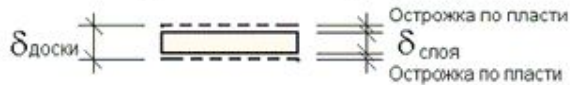


- Склеивают доски толщиной $\delta \leq 40 \dots 44$ мм и шириной $b \leq 175$ мм

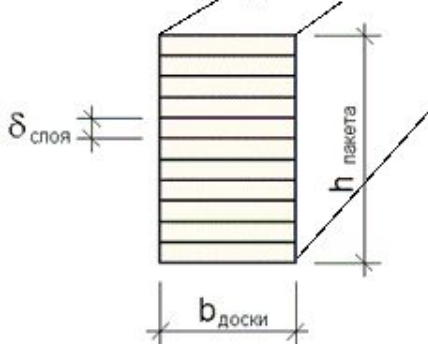
1. Доски с размерами, соответствующими сортаменту пиломатериалов



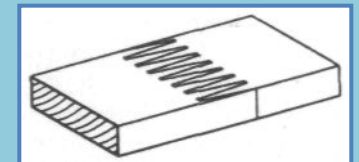
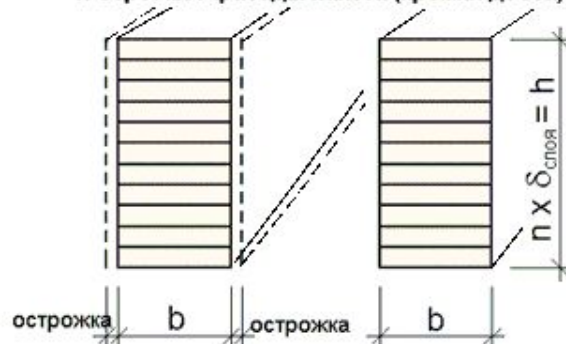
2. Строгают по пласти (не ранее, чем за 12 часов до склейки)



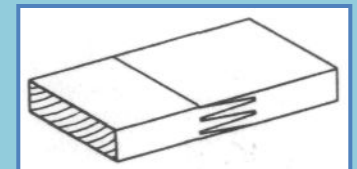
3. Склеивают доски в пакет



4. Строгают фасады пакета (кромки досок)



- При пролете > 6 м доски по длине стыкуют на зубчатый шип:



Расчет дощатоклеенных балок покрытий

В большинстве случаев расчет производят по схеме однопролетной свободно опертой балки на равномерную нагрузку q от собственной массы покрытия, балки и массы снега.

Дощатоклеенные балки рассчитывают как балки цельного сечения.

За основное расчетное сопротивление при изгибе принимается для сосны

1 сорта $R_{и} = 14$ МПа

2 сорта $R_{и} = 13$ МПа

3 сорта $R_{и} = 8.5$ МПа

Расчет балок

- При расчете дощатоклееных балок выполняют следующие проверки.

1. Проверка прочности по нормальным напряжениям:

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{M}{W_{\text{нт}} \cdot m_{\delta} \cdot m_{\phi}} \leq R_{\text{н}}$$

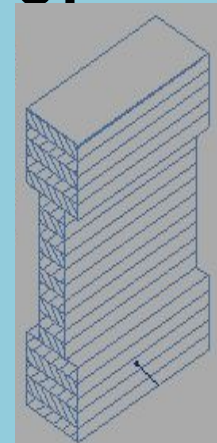
Здесь введены коэффициенты к моменту сопротивления:

m_{δ} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние размеров поперечного сечения на несущую способность балки, его значение приведено в СНиП II-25-80 в зависимости от высоты сечения h

$h=70 \text{ см} \rightarrow m_{\delta}=1,$

$h<70 \text{ см} \rightarrow m_{\delta} >1,$

$h>70 \text{ см} \rightarrow m_{\delta} <1;$



m_{ϕ} – коэффициент формы, для балок прямолинейной формы сечения $m_{\phi}=1$, для балок двутавровых сечений m_{ϕ} даны в учебнике Г. Г. Карлсена в зависимости от отношения ширины стенки к ширине пояса.

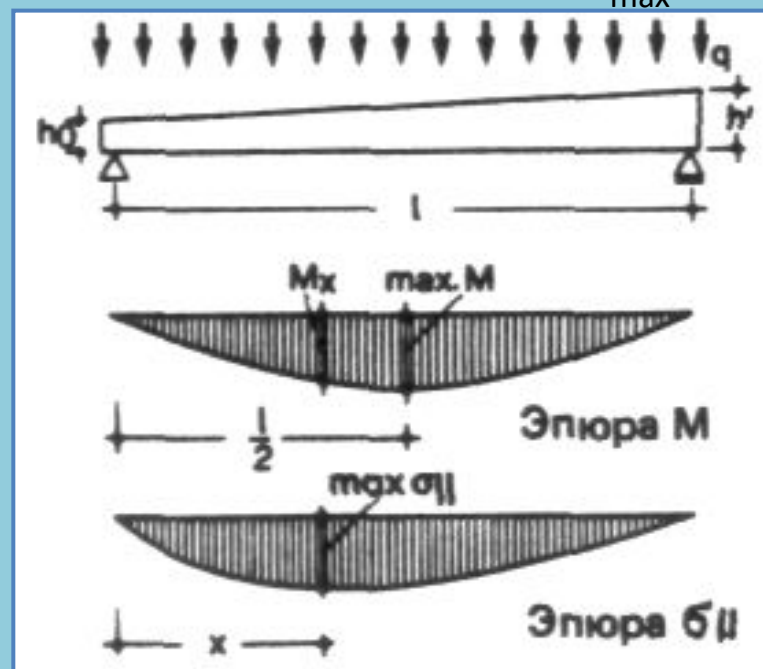
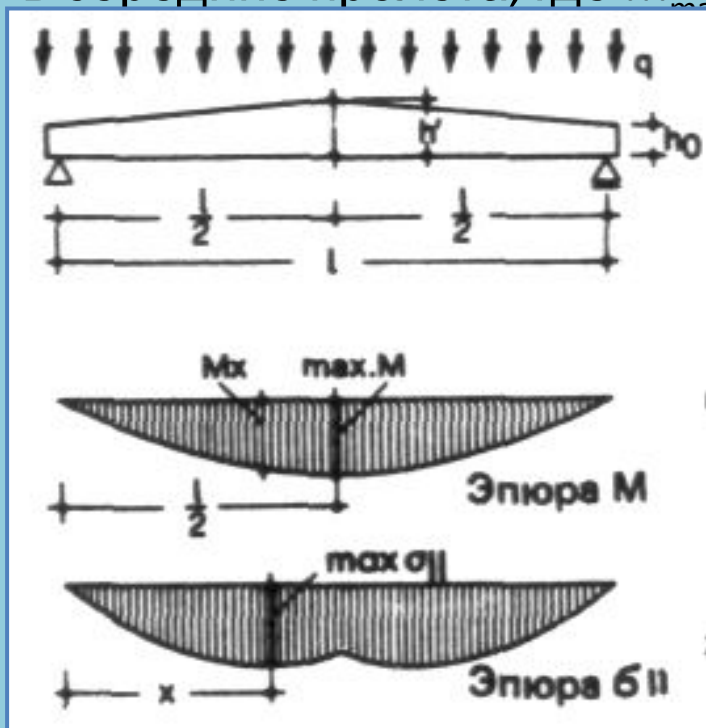
- **Расчетное сечение, где действуют максимальные нормальные напряжения, в балках переменной высоты не совпадает, как в балках постоянной высоты, с местом действия максимального изгибающего момента, поскольку момент сопротивления сечений уменьшается у них от середины балки быстрее, чем изгибающий момент.**
- **Расстояние расчетных сечений от опор X определяется путем отыскания максимума эпюры нормальных напряжений по длине балки.**

Это сечение находится из общего выражения для нормальных напряжений

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{M_{\text{х}}}{W_{\text{х}}}$$

Особенности проектирования балок с переменной высотой сечения

Максимальные нормальные напряжения действуют по сечению не в середине пролета, где M_{\max} , а в сечении X , где $\sigma = (M/W)_{\max}$.



В двускатной балке :

$$X = \frac{L \cdot h_{\text{оп}}}{2 \cdot h_{\text{ср}}}$$

Для нахождения экстремальных точек эпюры напряжений необходимо приравнять нулю выражение, полученное после дифференцирования выражения для σ_u .

В двускатной балке переменного сечения при равномерно распределенной

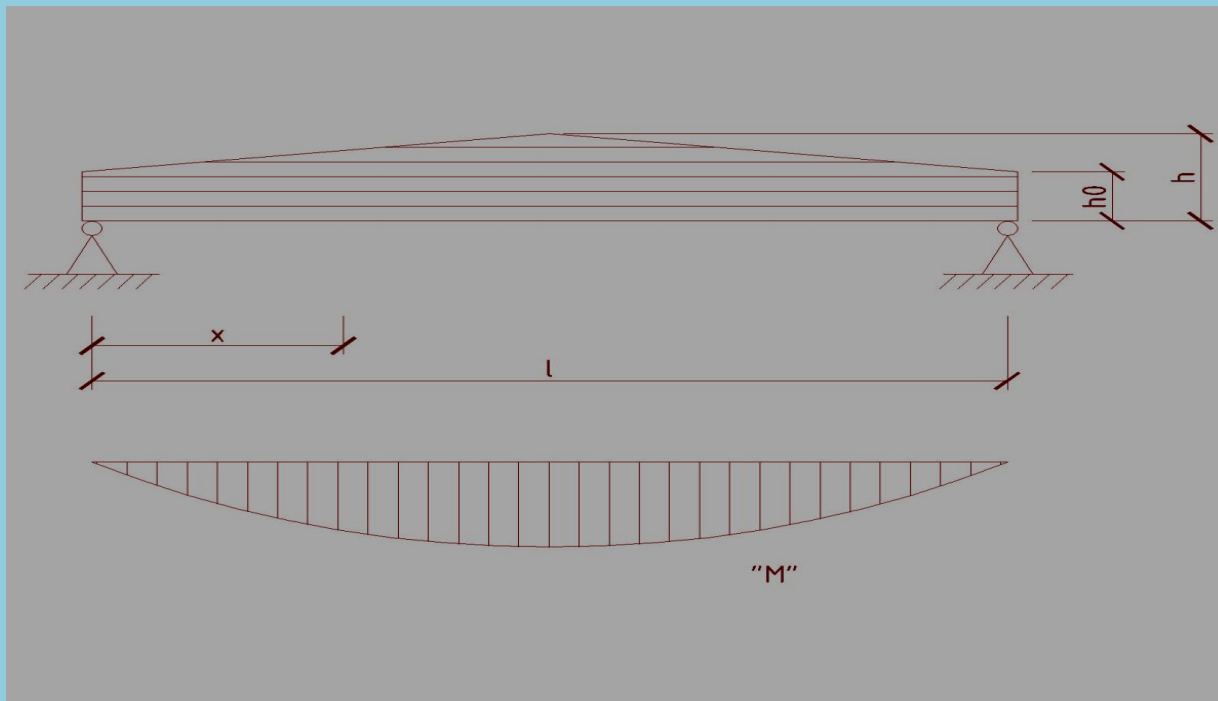
нагрузке $X = \frac{lh_{оп}}{2h}$

где $h_{\text{оп}}$ – высота опорного сечения,

$h_{\text{ср}}$ – высота сечения в середине пролета балки.

Изгибающий момент в этом случае равен

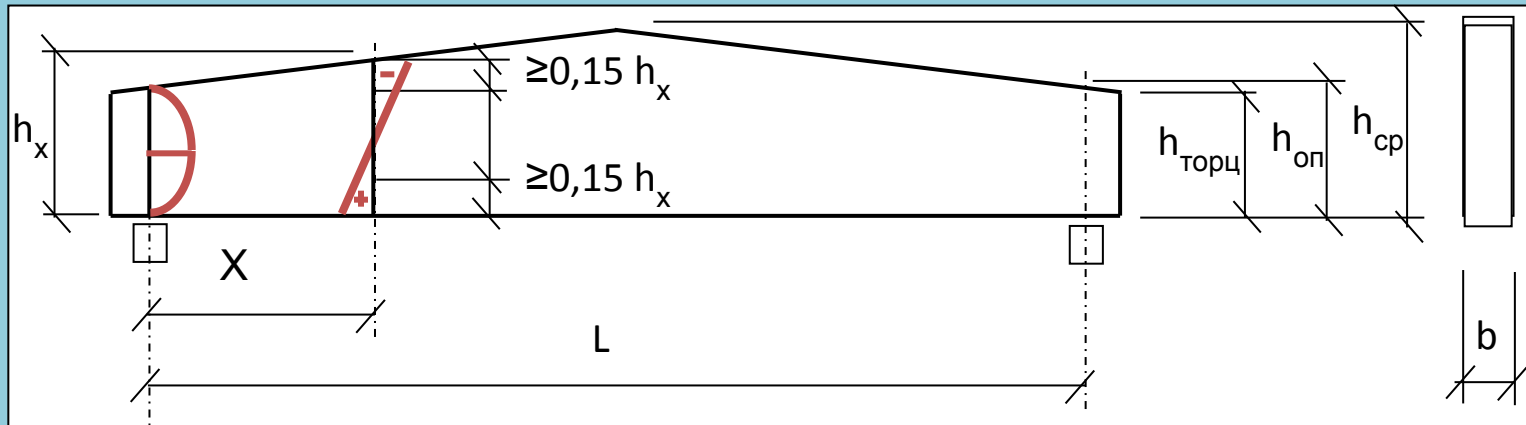
$$M = \frac{qx}{2}(l - x)$$



Эпюра изгибающего момента M

В гнутоклееных балках дополнительно проверяется еще и напряжения растяжения в гнутой зоне.

Распределение древесины разного сорта по высоте сечения также выполняется в сечении X.

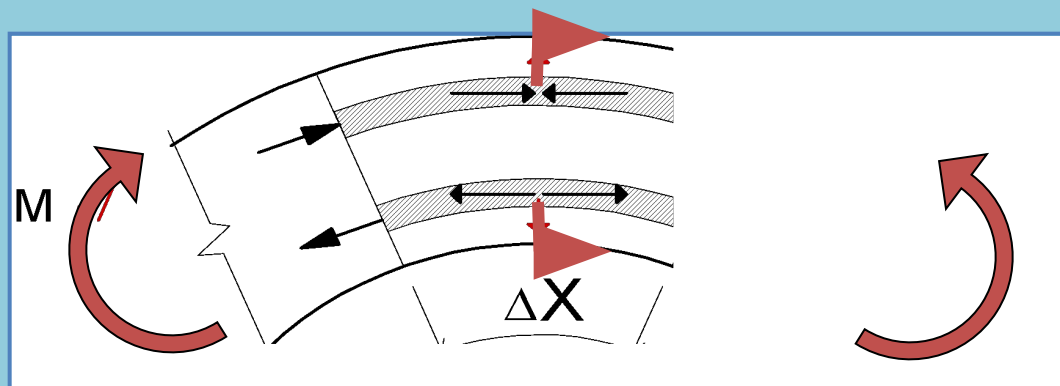
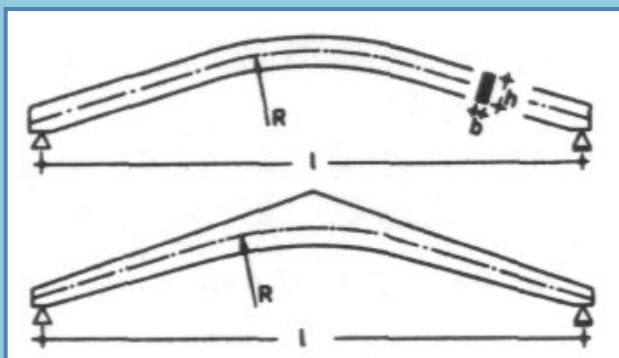


При проверке прочности сечения X на действие максимальных нормальных напряжений σ расчетное сопротивление изгибу ($R_{\text{и}}$) берется для того сорта древесины, который применен в крайних зонах сечения.

При проверке прочности опорного сечения на действие максимальных касательных напряжений τ расчетное сопротивление скалыванию ($R_{\text{ск}}$) берется для того сорта древесины, который применен в средней зоне сечения.

Особенности проектирования гнутоклееных балок

При проектировании гнутоклееных балок добавляется проверка прочности на действие радиальных растягивающих напряжений, направленных поперек волокон.



$$\sigma_r \leq R \delta_{,90}$$

К расчетному сопротивлению древесины растяжению, сжатию и изгибу вводится коэффициент, учитывающий радиус кривизны

$$m_{\text{ГН}} = 1 \dots 0,6.$$

2. Расчет на устойчивость плоской формы деформирования изгибаемых элементов.

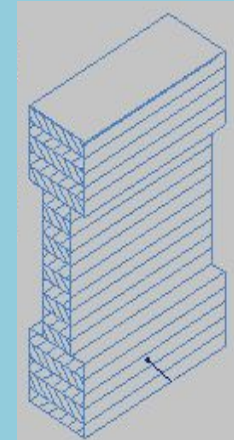
$$\sigma_{из} = \frac{M}{\varphi_m W_{br} \cdot m_\delta \cdot m_\phi} \leq R_{из}$$

где M – максимальный изгибающий момент на рассматриваемом участке l_p
 m_δ и m_ϕ – балочный коэффициент и коэффициент формы (применяются такими же, как и при расчете прочности).

φ_m – коэффициент устойчивости, зависящий от отношения высоты сечения к ширине.

3. Проверка прочности по скалывающим напряжениям в сечении с максимальной поперечной силой выполняется по формуле Журавского

$$\tau = \frac{Q S_{бр}}{J_{бр} b} \leq R_{ск}$$



где Q – поперечная сила,

$S_{бр}$ – статический момент относительно нейтральной оси той части площади сечения, которая расположена выше или ниже проверяемого шва,

$J_{бр}$ – момент инерции сечения,

b – ширина балки, и при двутавровом сечении – ширина стенки ($b=b_{ст}$).

4. Расчет по прогибам.

СНиП II-25-80 дает формулу для определения наибольшего прогиба шарнирно-опертых балок в виде:

$$f = \frac{f_0}{k} \left[1 + c \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]$$

где f_0 – прогиб балки постоянного сечения высотой h без учета деформаций сдвига, для загруженной равномерно-распределенной нагрузкой

$$f_0 = \frac{5q^H l^H}{384EJ}$$

h – наибольшая высота сечения,

l – пролет балки,

k – коэффициент, учитывающий влияние переменности высоты сечения, для балки постоянного сечения $k=1$,

c – коэффициент, учитывающий влияние деформации сдвига от поперечной силы.

Значение коэффициентов k и c для основных расчетных схем балок даны в приложении СНиП.

При проверке балки по прогибам должно выполняться условие

$$\frac{f}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right] \quad \left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{300}$$

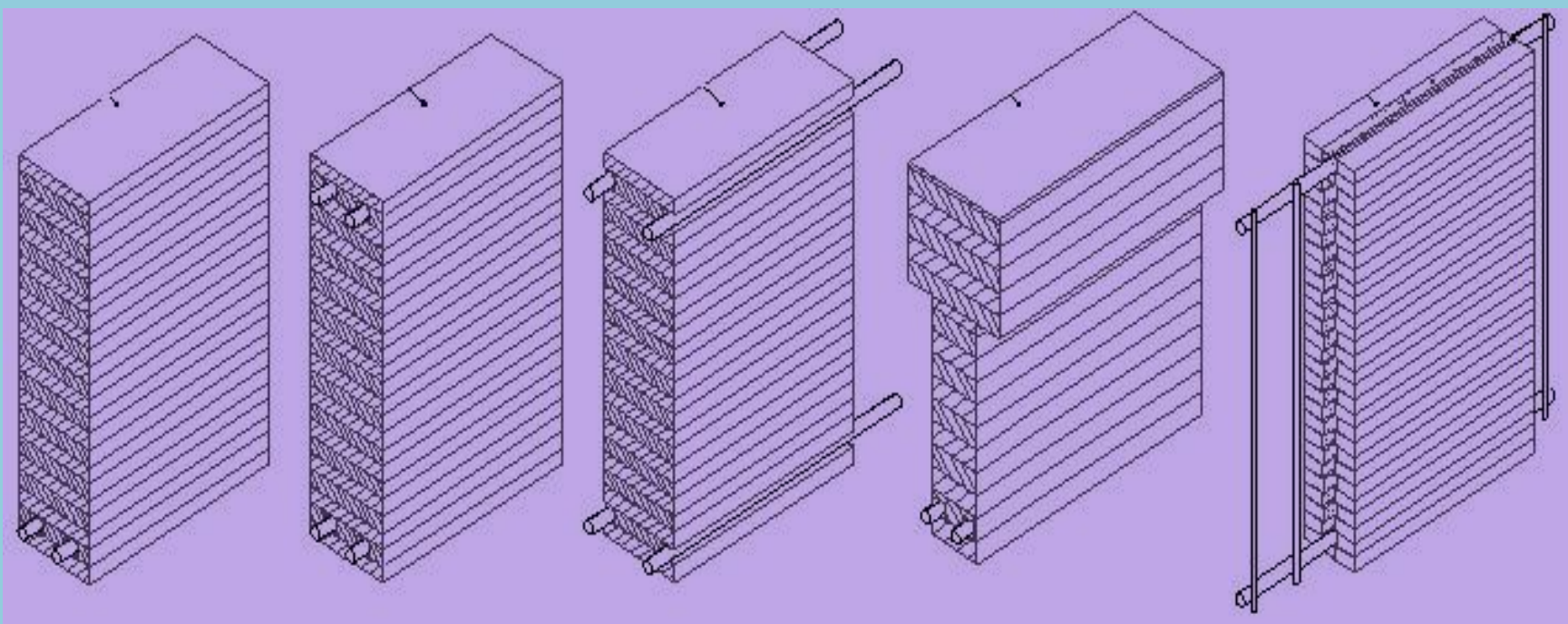
- Кроме основных проверок в ряде случаев выполняются дополнительные проверки.
- К таким проверкам относятся проверка на смятие опорной площадки балки, проверка напряжений растяжения в гнутых балках и т.п.

Кроме однопролетных балок в ряде случаев с эффектом применяют многопролетные и консольные дощатоклееные балки.

- Расчет таких балок производится по общим принципам строительной механики с учетом формы и высоты сечения (коэффициентов m_{δ} и m_{ϕ}).

- **В случае, если необходимо повысить несущую способность и жесткость балки иногда выполняют армирование дощатоклееных балок.**

Дощатоклееные армированные балки представляют собой деревянные клееные балки, в которые вклеиваются стержни стальной арматуры.



Дощатоклееная армированная балка

- **Целесообразно выполнять армирование двойной арматурой классов А-III и А-IV.**
- **Армирование находится в пределах 2...4 %.**
- **Клей чаще всего эпоксидно-цементный.**

Расчет армированных балок на изгиб производится с учетом совместной работы клееной древесины и арматуры методом приведенных сечений, учитывающим модуль упругости

$$J_{\text{прд}} = J_{\text{др}} + J_{\text{ф}} \frac{E_{\text{ф}}}{E_{\text{др}}}$$

Расчет армированных балок по прочности производят исходя из того, что древесина разрушается раньше, чем стальная арматура:

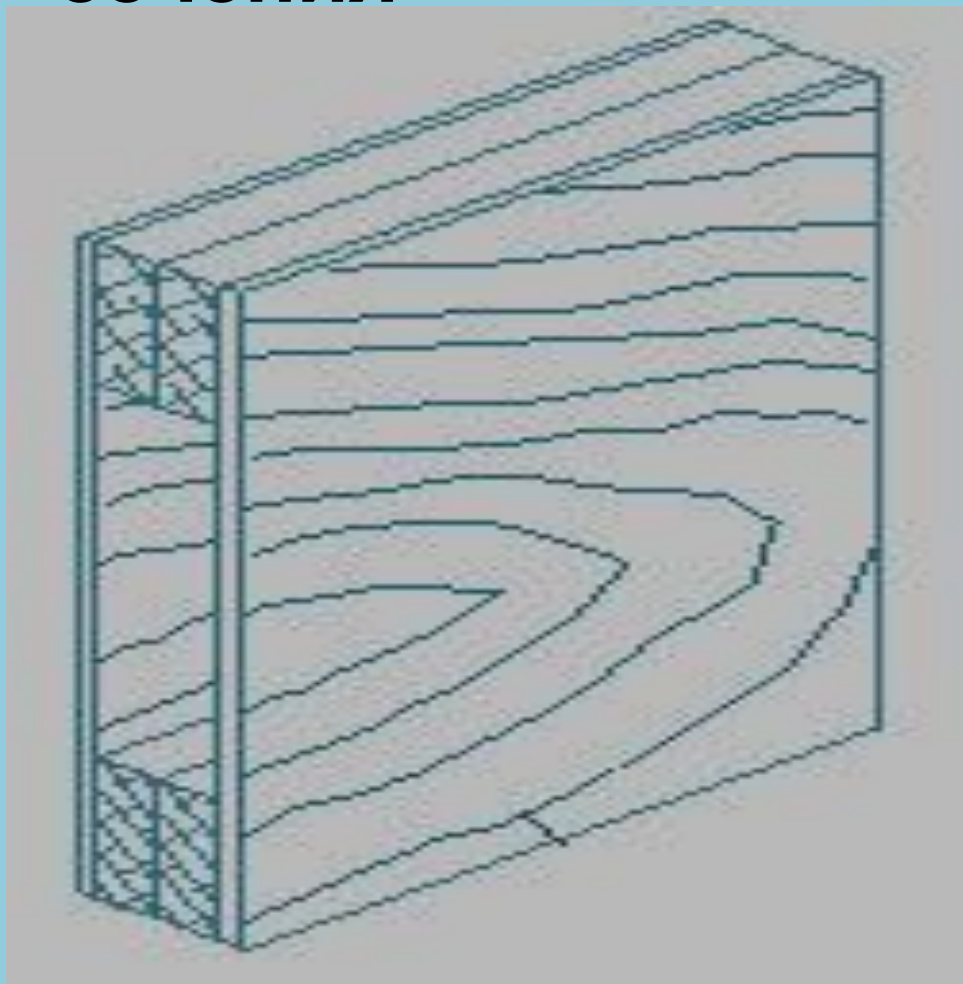
$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{пр}} \cdot m_{\delta}} \leq R_{\text{д}} = 15 \text{ МПа}$$

Клеефанерные балки

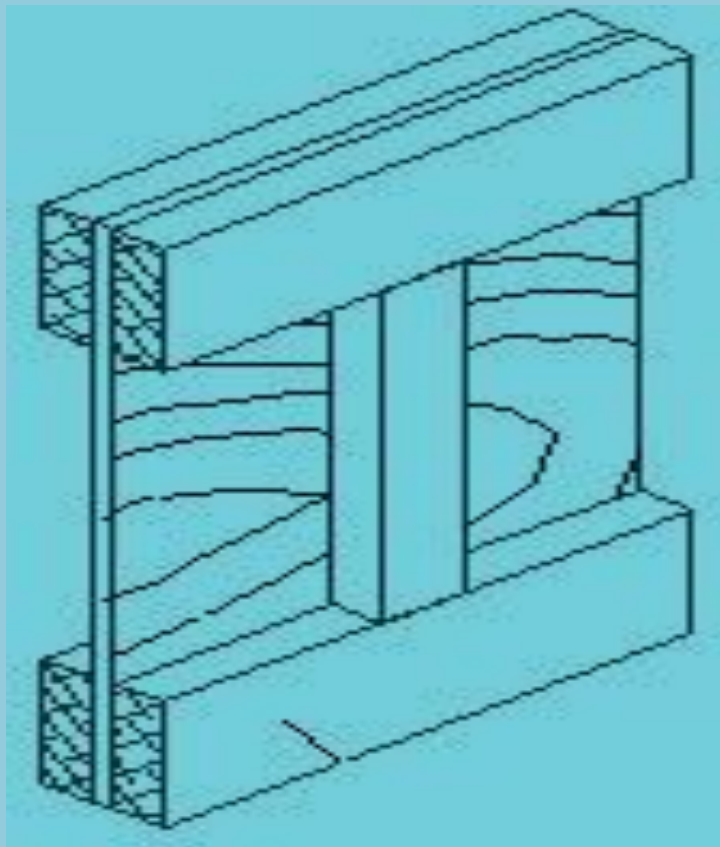
- По форме сечения могут быть **коробчатыми, двутавровыми, двутаврово-коробчатыми** (склеенными из двух или нескольких двутавров), **треугольными, трапециевидными.**

Однако наибольшее распространение в отечественном и зарубежном строительстве получили первые три вида балок:

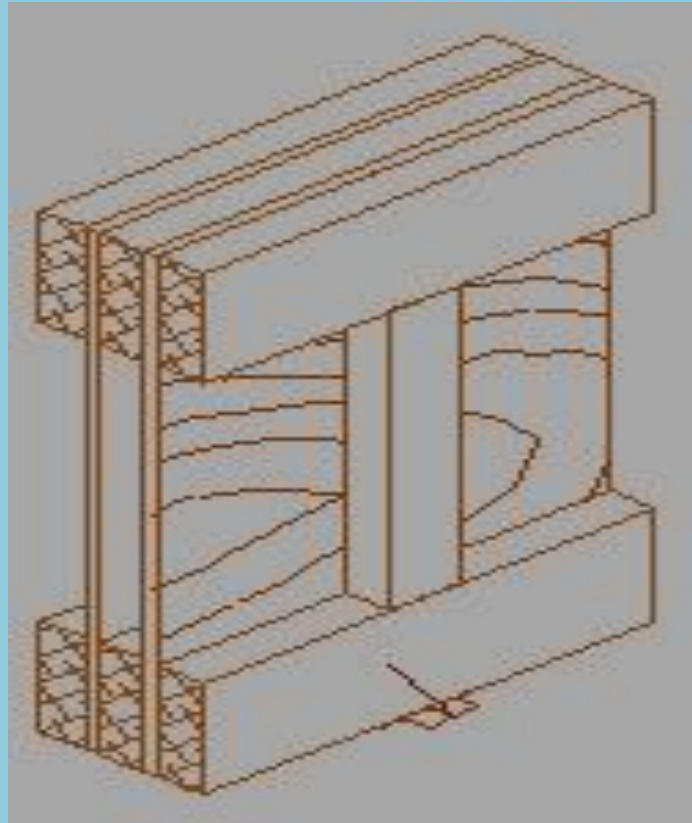
1) коробчатого сечения



2) двутаврового сечения

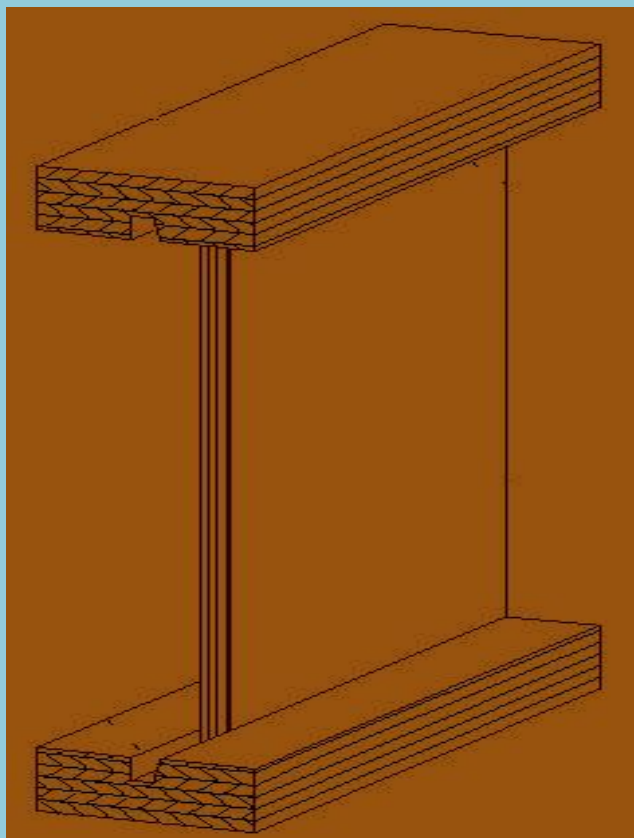


3) двутаврово-коробчатого сечения



- Традиционно клеефанерные балки состоят из дощатых поясов и фанерных стенок, однако в настоящее время предпринимаются попытки создания цельнофанерных конструкций, что позволяет экономить пиломатериал.
- Примером таких конструкций является цельнофанерная клееная балка, изобретенная в США

4) Цельнофанерная клееная балка двутаврового сечения



Предпринимаются попытки создания балок двутаврового сечения с поясами из манерных профилей (уголков), С-Петербург.

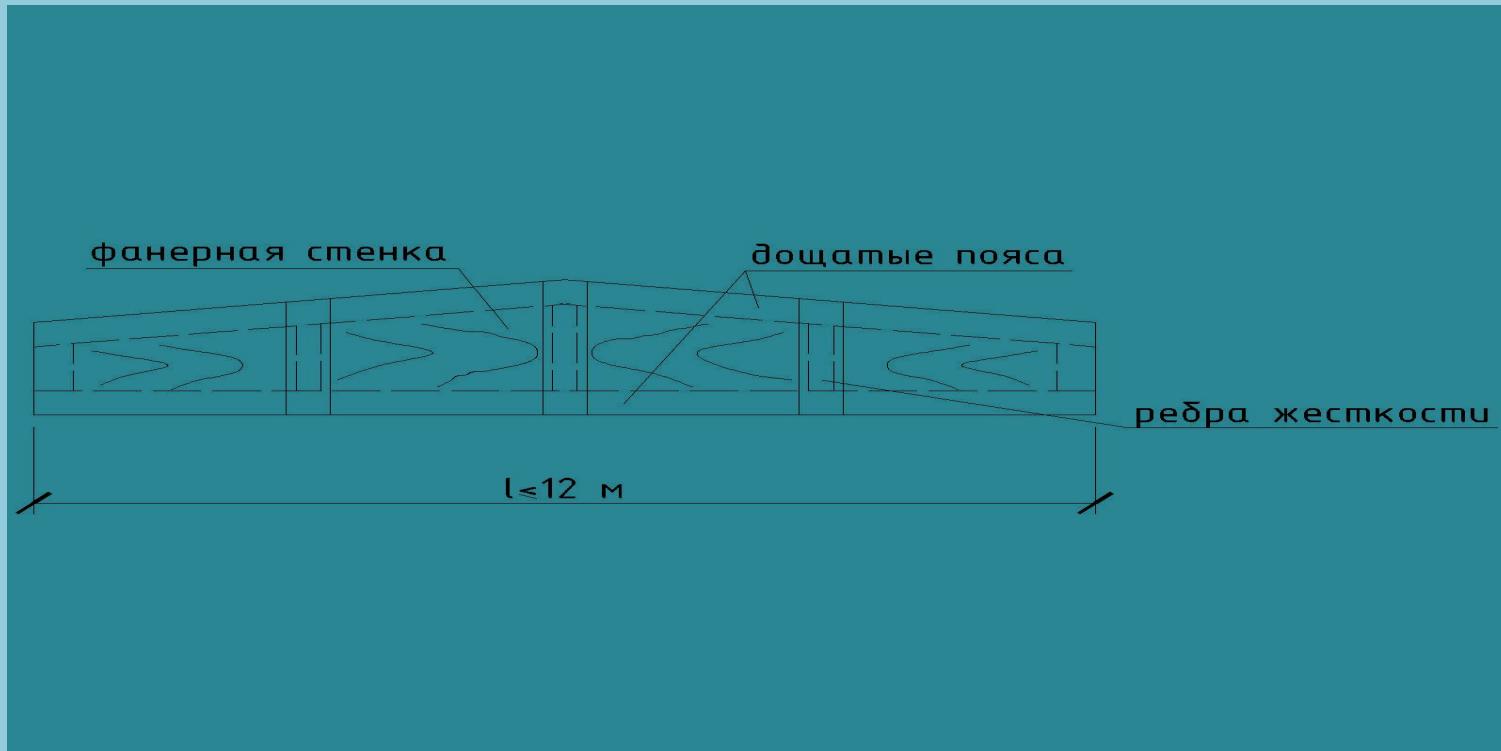
По длине клеефанерные балки могут иметь постоянное или переменное сечение.

Их высоту в середине пролета определяют расчетом на изгиб и она получается близкой к $1/10...1/12$ пролета.

Высоту сечения на опоре определяют расчетом стенок на срез и устойчивость, но она должна быть не меньше 0.4 от высоты в середине пролета.

- Стенки клеефанерных балок изготавливают из водостойкой строительной фанеры толщиной 10...12 мм.
- Направления наружных волокон фанеры следует принимать параллельным волокном поясов и продольным осям балки.
- При этом стенка работает на изгиб в направлении наибольшей прочности и жесткости.
- Фанера стыкуется «на ус», либо встык с накладками.
- Как правило, в местах стыкования фанеры ставятся ребра жесткости, т.е. по длине балки ребра ставятся с шагом, равным $1/8...1/10$ пролета.

Расстановка ребер жесткости



- По плоскостям склеивания с фанерными стенками пояса должны иметь прорези для того, чтобы ширина клеевых швов не превосходила 10 см для предотвращения перенапряжений швов при короблении.
- По длине доски соединяются зубчатым стыком.
- Нижние растянутые пояса должны изготавливаться из досок 2 (или 1) сорта, сжатые пояса и ребра – из 2 (или 3) сорта.

Расчет ребристых клеефанерных балок производят на изгиб с учетом совместной работы дощатых поясов и фанерных стенок.

В двускатных балках переменной высоты сечения, где при равномерной нагрузке действуют максимальные напряжения изгиба, находятся не в середине пролета, а на расстоянии X от опоры:

$$X = \left[\sqrt{\gamma(1 + \gamma)} - \gamma \right]$$

- где $\gamma = h_{\text{оп}} / l_i$,
- где $h_{\text{оп}}$ – высота опорного сечения между осями поясов,

l – пролет балки,

i – уклон верхнего пояса.

- Изгибающий момент в этом сечении равен . $M = 0.5qx(l - x)$
- Геометрические характеристики сечений клеефанерных балок определяются с учетом различных модулей упругости древесины (E_g) и фанеры (E_f).

В результате определяются приведенные к древесине поясов геометрические характеристики сечения

$$J_{\text{прд}} = J_{\text{др}} + J_{\text{ст}} \frac{E_{\text{ст}}}{E_{\text{др}}}$$

$$W_{\text{прд}} = \frac{2J_{\text{прд}}}{h}$$

При расчете ребристой клеефанерной балки выполняют следующие проверки.

1. Проверка нормальных напряжений в поясах из древесины и фанерной стенке балки производится на действие максимального изгибающего момента по формулам:

- для растянутого пояса

$$\sigma_p = \frac{M}{W_{\text{прд}}} \leq R_p$$

-для сжатого пояса

$$\sigma_c = \frac{M_x}{W_{\text{прд}}\varphi} \leq R_c$$

Здесь φ – коэффициент продольного изгиба,

- для фанерной стенки

$$\sigma_{p\phi} = \frac{M}{W_{прд\phi}} \frac{E_{\phi}}{E_d} \leq R_{\phi p} m_{\phi}$$

m_{ϕ} – коэффициент, учитывающий снижение сопротивления фанеры в стыке «на ус» (для обычной фанеры $m=0.6$, для бакелизированной 0.8)

- **2. Проверка прочности фанерных стенок на совместное действие касательных и нормальных напряжений с учетом анизотропии фанеры, т.е. проверка по главным напряжениям в зоне перехода от поясов к стенкам**

$$\sigma_p^1 = \frac{\sigma_{ст}}{\alpha} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ст}}{2}\right)^2 + \tau_{ст}^2} \leq R_{ф\alpha}$$

σ_p – главные напряжения,

$\sigma_{ст}, \tau_{ст}$ – нормальные и касательные напряжения в стенке на том же уровне,

$R_{ф\alpha}$ – расчетное сопротивление фанеры растяжению под углом α ,
определяются по графику приложения 5 СНиП,

α – угол наклона направления главного напряжения к оси балки,
определяется из зависимости

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{ст}}{\sigma_{ст}}$$

3. Проверка на скалывание между слоями шпона в местах приклейки стенок к поясам

$$\tau_{\text{ск}} = \frac{Q S_n}{J_{\text{брф}} \sum b_{\text{ш}}} \leq R_{\text{фск}}$$

S_n – статический момент пояса относительно оси балки,

$\sum b_{\text{ш}}$ – суммарная длина в сечении клеевых швов приклейке поясов к стенкам, $\sum b_{\text{ш}} = n h_n$ (h_n – высота пояса, n – число вертикальных швов)

$R_{\text{фск}}$ – расчетное сопротивление фанеры скалыванию.

4. Проверка фанерной стенки на срез (у опор) по нейтральной оси

$$\tau_{\text{ед}} = \frac{QS_{\text{прф}}}{J_{\text{прф}} \sum \delta_{\text{ф}}} \leq R_{\text{фср}}$$

$S_{\text{прф}}$ – приведенный к фанере статический момент половины поперечного сечения балки относительно ее оси,

$\sum \delta_{\text{ф}}$ – суммарная толщина фанерных стенок.

5. Проверка стенки на местную устойчивость (в середине приопорной панели)

Для обеспечения устойчивости стенки при продольном расположении волокон относительно оси балки должно быть

$$h_{\text{ст}}/\delta \leq 50,$$

где $h_{\text{ст}}$ – высота стенки в середине опорной панели, δ – толщина стенки.

Если $h_{\text{ст}}/\delta > 50$, то должна быть выполнена проверка на местную устойчивость.

Расчет устойчивости следует производить по формуле:

$$\frac{\sigma_{ст}}{K_u \left(\frac{100\delta}{h_{ст}} \right)^2} + \frac{\tau_{ст}}{K_\tau \left(\frac{100\delta}{h_{расч}} \right)^2} \leq 1$$

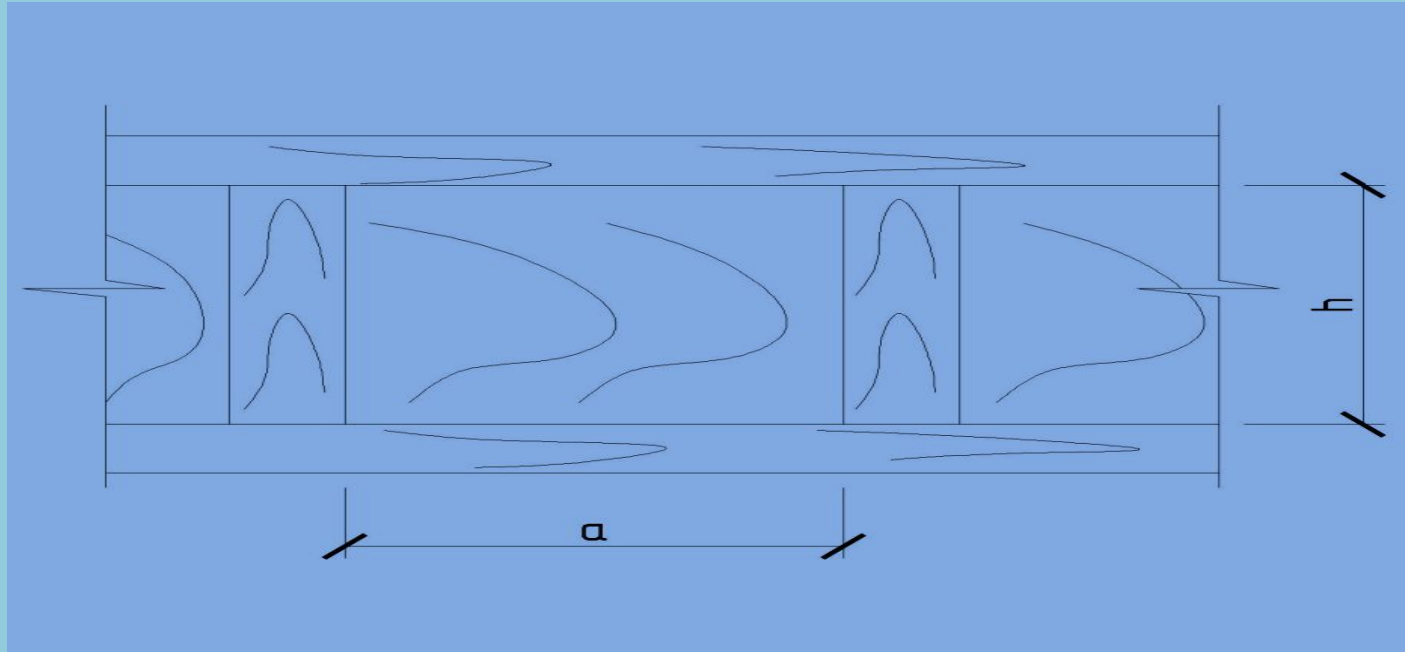
Здесь K_u , K_τ – коэффициенты, определяемые по графикам СНиП,

$h_{ст}$ – высота стенки между внутренними гранями полок, $h_{расч} = h_{ст}$ при $a \geq h_{ст}$,

$h_{расч} = a$ при $a < h_{ст}$, a – расстояние между ребрами в свету.

Здесь $\delta_{ст}$, $\tau_{ст}$ – нормальные и касательные напряжения в середине опорной панели, знаменатели (в формуле проверки устойчивости стенки) – это критические напряжения, при которых стенка теряет устойчивость.

Расстановка ребер жесткости



6. Расчет по прогибам

$$\frac{f}{l} \leq \left[\frac{f}{l} \right] \quad \left[\frac{f}{l} \right] = \frac{1}{300}$$

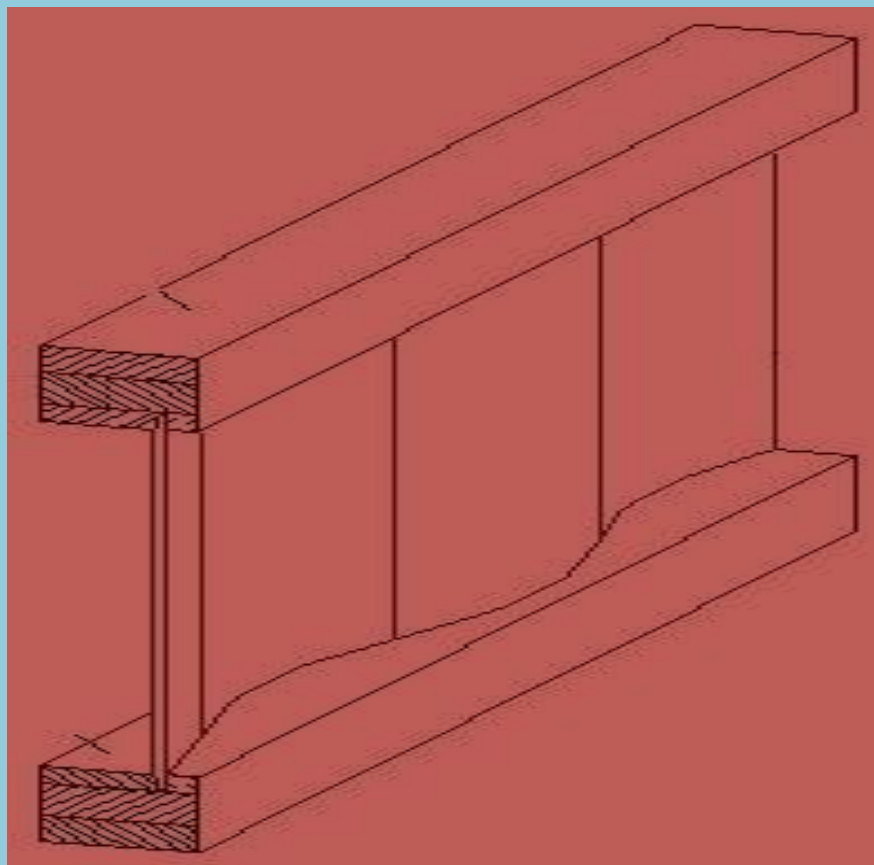
$$f = \frac{f_0}{k_H l^4} \left[1 + c \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]$$

$$f_0 = \frac{5}{384} \frac{q l^4}{E_g J_{\text{прд}}}$$

- **Клеефанерная балка с волнистой стенкой относится к классу малогабаритных балок. Пояса состоят из одиночных досок 2-го сорта.**
- **Они располагаются горизонтально плашмя, и в их плоскостях образуется волнистый паз клиновидного сечения.**

Фанерная стенка имеет волнистую форму, вклеиваются краями в пазы.

Клеефанерная балка с волнистой стенкой



- Благодаря волнистой форме стенка лучше сопротивляется потере устойчивости, чем плоская.

Расчет плоских балок производится с учетом того, что стенка практически не работает на нормальные напряжения при изгибе и эти напряжения воспринимаются только поясами.

- Кроме того благодаря своей форме стенка является податливой, поэтому расчет таких балок по прочности и прогибам при изгибе производят как составных балок с податливой стенкой.