

Тема: «Конструкция самолётов»

*Курс лекций для выпускников ВУЗов и специалистов неавиационного
профиля ЗАО «Инженерный Центр ИКАР»*



Часть 1

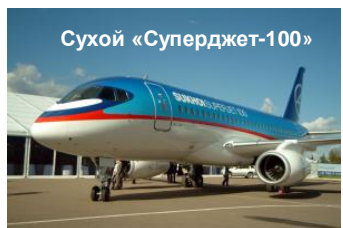
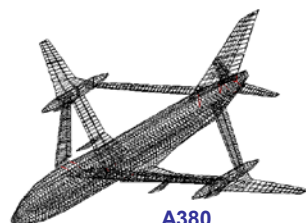
Ендогур Аскольд Иванович,

Профессор,

Доктор технических наук,

Действительный член Академии проблем качества

**СОЗДАНИЯ У СЛУШАТЕЛЕЙ
ПОНИМАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО СМЫСЛА
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИИ
САМОЛЕТА**



Участие автора в проектировании конструкций самолётов

- **T-4** – Конструкция воздухозаборника по американской технологии;
- **МиГ-25МП** – Серийная стальная конструкция воздухозаборника и сотовых панелей,
– Опытные элероны и закрылки из КМ.
- **ВКС «Буран»** - Теплозащитные, жаростойкие и высокотемпературные конструкции;
- **A380** – Проект нетрадиционной конструкции в аэродинамической схеме «Полиплан» (по гранту МНТЦ);
- **«Сухой Суперджет-100»** - разработка и оптимизация отсека фюзеляжа из КМ.
- **SSBJ (Super Sonic Business Jet)** – Разработка и оптимизация конструкции крыла из КМ.

СИЛА – внешнее воздействие, приложенное к точке тела или к конструкции, имеющее направление и величину.

$$F = ma ,$$

ВЕС - сила, с которой тело притягивается к земле, чаще всего обозначается G .

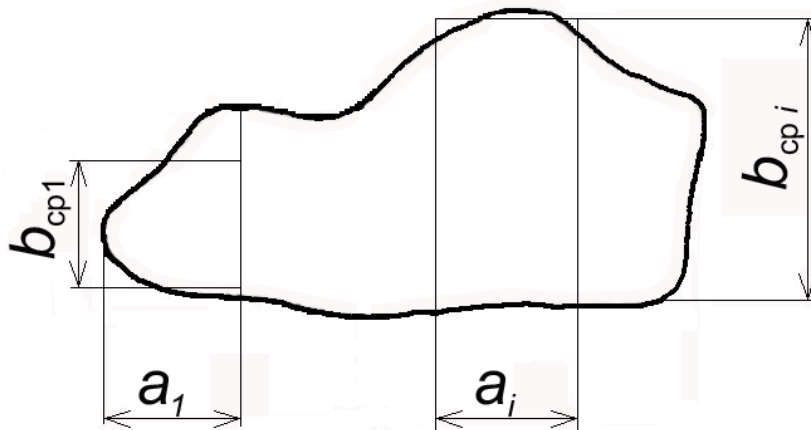
$$G = mg ,$$

ДАВЛЕНИЕ – внешняя нагрузка на единицу площади, Н/м², МПа, бар.

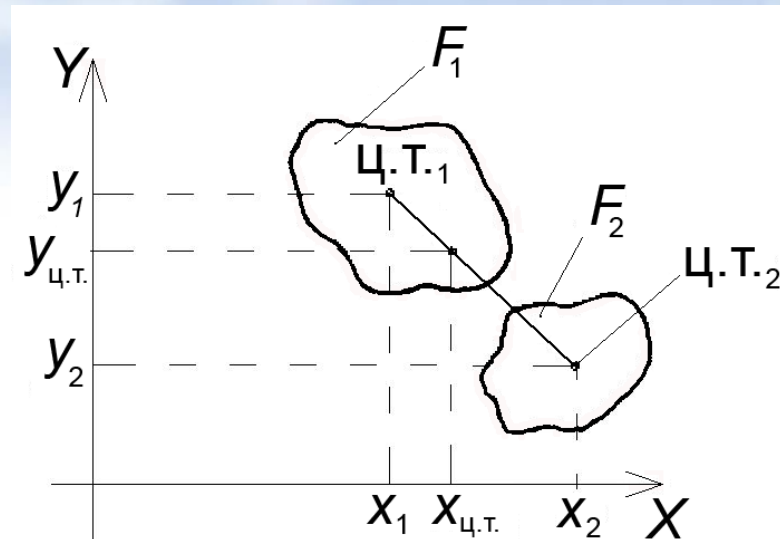
НАПРЯЖЕНИЕ в сечении элемента конструкции – это внутренняя сила, которая приходится на единицу площади сечения детали при действии внешних нагрузок.

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

$$F_{\Sigma} = \sum F_i \approx a_1 \cdot b_{cp1} + a_2 \cdot b_{cp2} \dots + a_i b_i \dots + a_n b_n$$



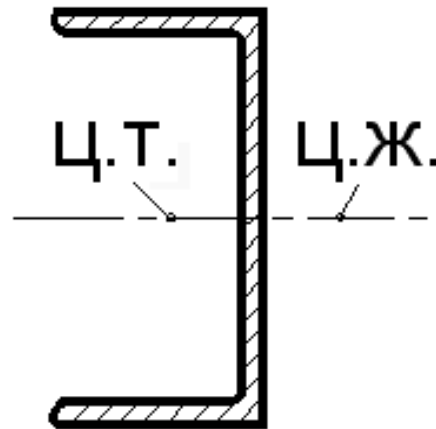
ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ (ц.т.) – это точка, при подвешивании за которую тело уравновешено.



Центр тяжести составных сечений.

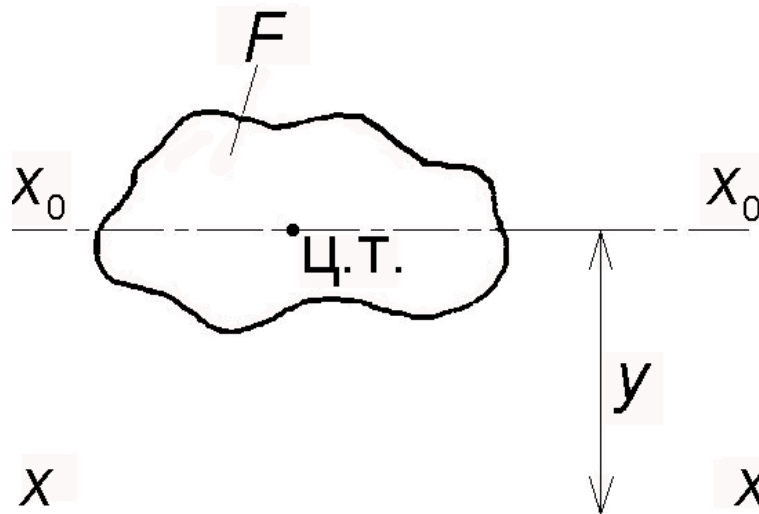
$$x_{ц.т.} = \frac{\sum F_i y_i}{\sum F_i}, \quad y_{ц.т.} = \frac{\sum F_i x_i}{\sum F_i},$$

Точка сечения, прикладывание к которой равнодействующей силы, не приводит к возникновению изгибающего или крутящего момента.



СТАТИЧЕСКИЙ МОМЕНТ площади F относительно оси x .

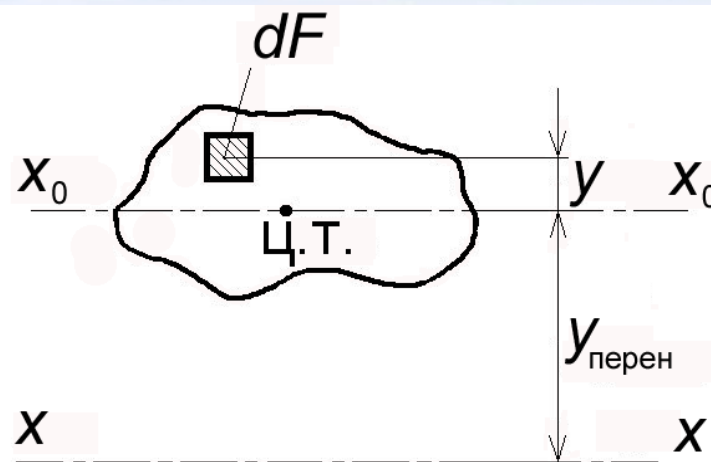
$$S = Fy,$$



МОМЕНТ ИНЕРЦИИ площади сечения относительно оси x .

$$I_{xx} = I_{\text{собств}} + I_{\text{перен}},$$

$$I_{\text{перен}} = F \cdot y_{\text{перен}}^2$$

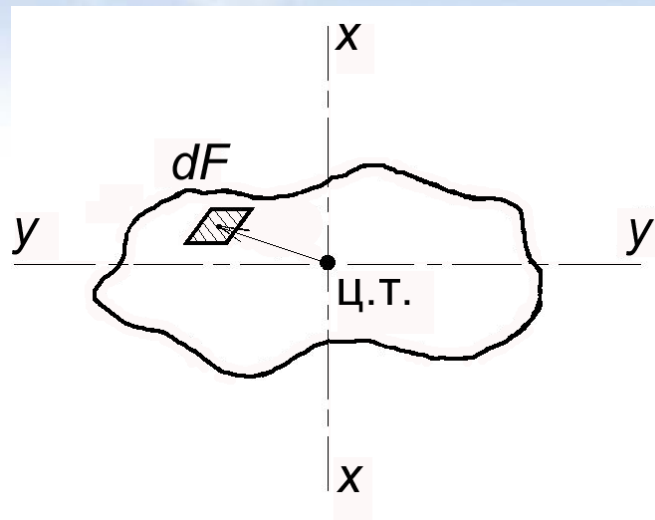


МОМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЕЧЕНИЯ относительно оси x .

$$W_x = \frac{I_{x_0x_0}}{y}$$

ПОЛЯРНЫЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ СЕЧЕНИЯ относительно ц.т.
(ц.ж.) сечения.

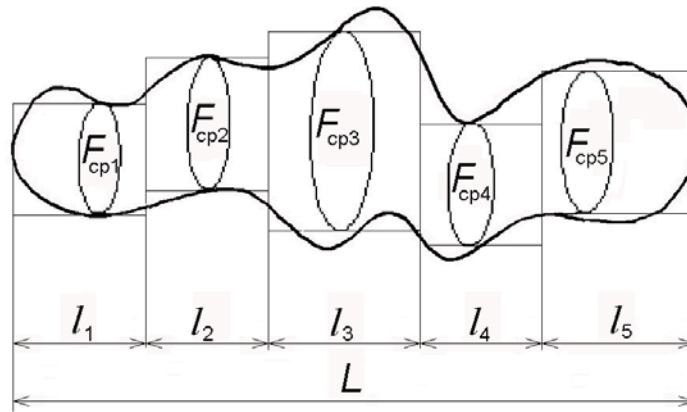
$$I_{\rho} = \sum_F F \cdot \rho^2$$



ПОЛЯРНЫЙ МОМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

$$W_{\rho} = \frac{I_{\rho}}{\rho}$$

$$V_i = F_{cp\ i} l_i \quad V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n V_i$$



МАССА (ВЕС) ДЕТАЛИ, КОНСТРУКЦИИ

$$m = V \cdot \rho \quad (\text{или вес } G = V \cdot \gamma),$$

Масса конструкции агрегата – сумма масс всех входящих в конструкцию силовых (СИЛОВАЯ МАССА $m_{\text{сил}}$) и конструктивных элементов (КОНСТРУКТИВНЫЙ ДОБАВОК МАССЫ $\Delta m_{\text{конст}}$).

$\Delta m_{\text{конст}}$ лежит в пределах 25...50%.

Масса детали (агрегата)– это завершающая характеристика детали (или агрегата), которая ставится конструктором в штампе чертежа. Если эта величина укладывается в заданную (ЛИМИТНУЮ) массу детали или агрегата, то процесс проектирования завершается (на время, пока не окажется, что этого недостаточно).

НАПРЯЖЕНИЕ в сечении элемента конструкции - это сила, которая приходится на единицу площади сечения детали при действии внешних нагрузок.

Н/м² (Паскаль), и МПа (10⁶ Н/мм² – Мегапаскаль).

НАПРЯЖЕНИЯ при *РАСТЯЖЕНИИ* и *СЖАТИИ* действуют перпендикулярно, то есть по нормали, к осям плоскости сечения и называются *НОРМАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ*, чаще всего обозначаются буквой « σ ».

Предел прочности при растяжении σ_e , при достижении этого значения материал разрушается.

$$\text{Действующее напряжение } \sigma = \frac{P}{F}$$

Действуют в плоскости сечения по касательной к этой плоскости и называются *КАСАТЕЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ*, обозначаются буквой « τ ».

Действующее напряжение $\tau_y = \frac{QS_y}{Ib_y}$, или $\tau_y = \frac{Q}{F} \beta$

Предел прочности при сдвиге $\tau_{\text{в}}$, при достижении этого значения материал **разрушается**.

$$\tau_{\text{в}} = 0,6 \dots 0,65 \sigma_{\text{в}},$$

ДЕЙСТВУЮЩИЕ НАПРЯЖЕНИЯ $\sigma_{дейст}$ ($\tau_{дейст}$) или σ_{∂} (τ_{∂}) – конкретное значение напряжения, соответствующее действующей нагрузке, приложенной к данному сечению.

ФАКТИЧЕСКОЕ РАЗРУШАЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ $\sigma_{факт}$ – напряжение в сечении конструкции, при достижении которого конструкция разрушается при испытаниях на прочность.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАЗРУШАЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ $\sigma_{теор}$ – величина разрушающего напряжения в сечении конструкции, полученная при использовании теоретических формул или численных методов расчета.

ДОПУСТИМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ – величина напряжения, которое не может быть превышено по условиям специфики нагружения силового элемента: высокая температура, ресурс, условие надежности, потеря устойчивости, концентрация напряжений и др.

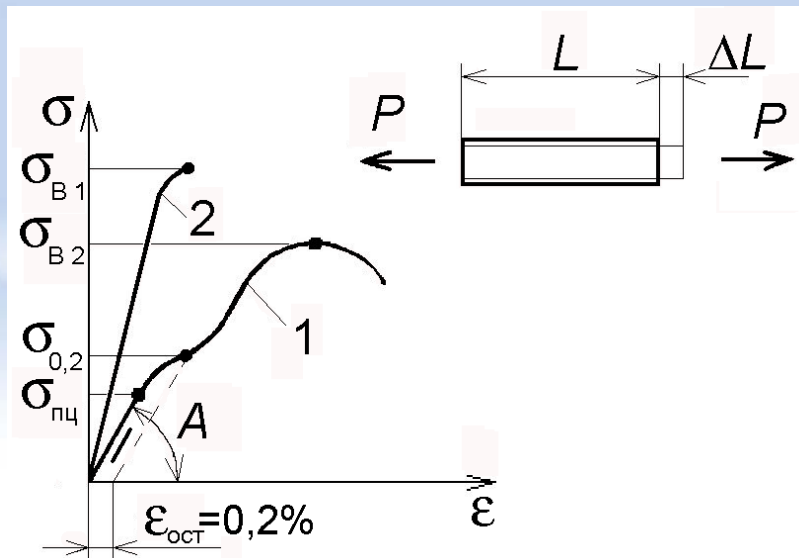
Деформация бывает упругая и пластическая.

УПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ - исчезает после удаления нагрузки;

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ - остается после удаления нагрузки.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ – отношение абсолютной деформации к начальному размеру детали агрегата.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$



Диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » при растяжении образцов 1 и 2

$$\varepsilon_{ост} = \frac{\Delta L_{ост}}{L}. \quad \operatorname{tg} A = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E - \text{модуль упругости 1-го рода.}$$

Напряжения связаны с деформацией законом Гука $\sigma = E\varepsilon$

При нагружении сдвигом характеристикой прочности материала является предел прочности при сдвиге - $\tau_{\text{с}}$ (Н/мм²), характеристикой жёсткости является модуль упругости G (Н/мм²).

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)},$$

G – модуль упругости 2-го рода.

Коэффициент Пуассона μ - это отношение величины поперечной деформации образца при растяжении к продольной.

При использовании *эксплуатационных* нагрузок при расчёте на статическую прочность конструкции за уровень *допустимых* напряжений принимают значения предела пропорциональности

$$\sigma_{п.ц.} \approx \sigma_{0,2}.$$

При применении расчётных нагрузок для расчётов на статическую прочность максимальные значения разрушающих напряжений принимают равными $\sigma_{в}$ или $T_{в}$.

Расчёты конструкции на прочность проводят также из условия максимально возможных *ДОПУСТИМЫХ* напряжений, меньших, чем максимальные *разрушающие* ($\sigma_{в}$, $T_{в}$), например, из условий разрушения от *потери устойчивости* силовым элементом конструкции, снижению разрушающих напряжений при повышенной рабочей температуре конструкции, длительной работе в условиях переменных напряжений и др.

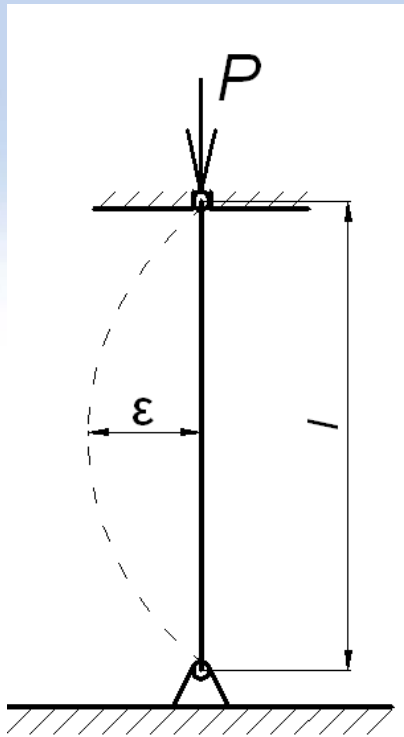
Вид разрушения, когда при сжатии или сдвиге при достижении величины напряжения, называемого **критическим** ($\sigma_{крит}$ всегда меньше σ_B , $\tau_{крит}$ меньше τ_e), внезапно образуется общая или местная волна деформации, приводящая к разрушению элемента конструкции.

КРИТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ – напряжение, при достижении которого происходит разрушение конструкции по форме общей или местной потери устойчивости.

ОБЩАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ - характеризуется деформацией оси элемента конструкции (например, оси стойки, стрингера).

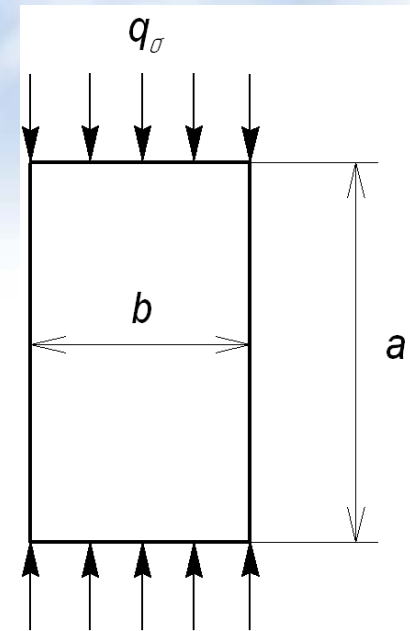
МЕСТНАЯ ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ – характеризуется появлением деформации на локальном, местном участке тонкостенной конструкции (например, одной из полок уголкового стрингера).

Общая потеря устойчивости (появление общей волны)



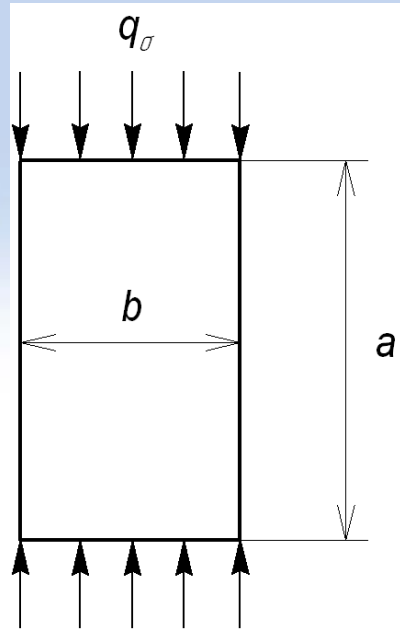
Форма общей потери устойчивости стержня

$$\sigma_{кр} = \frac{m^2 \pi^2 E}{\left(\frac{l}{i}\right)^2}$$



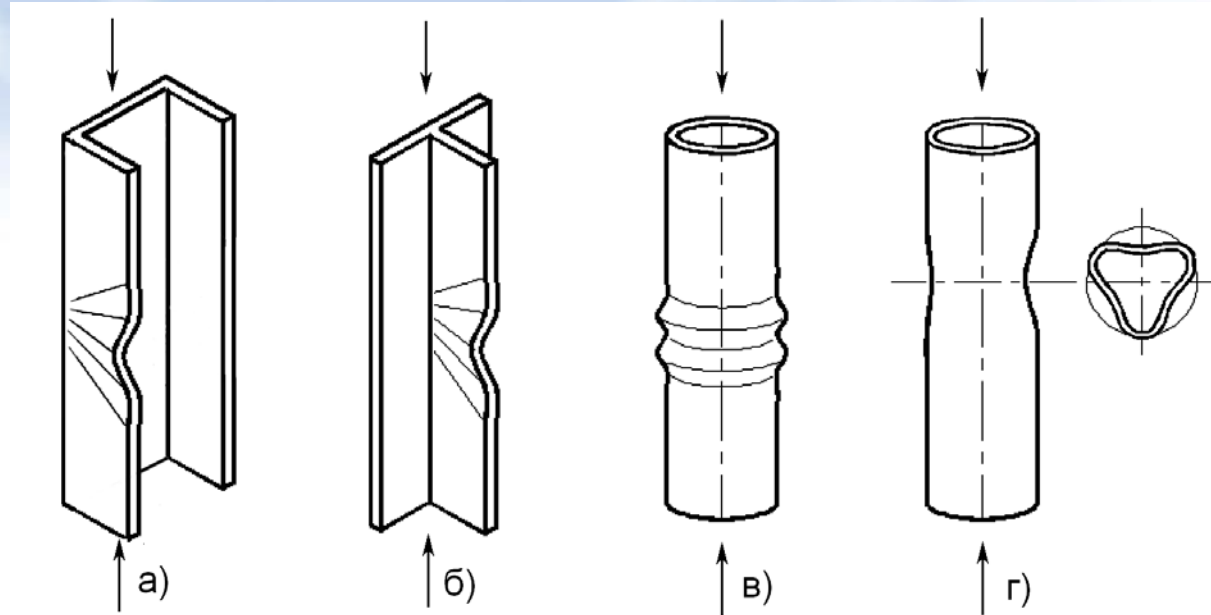
Форма общей потери устойчивости пластиной

Формы местной потери устойчивости



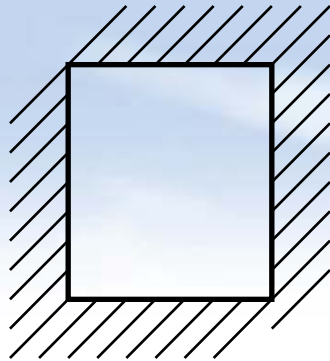
Для пластины $\sigma_{кр} = \frac{kE}{\left(\frac{b}{\delta}\right)^2}$

$k = 0,4 \dots 0,9$

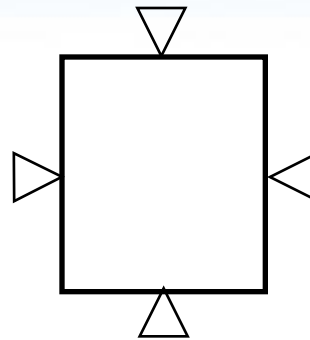


Для трубы $\sigma_{кр} = \frac{kE}{\frac{R}{\delta}}$ $k = 0,3 \dots 0,6$

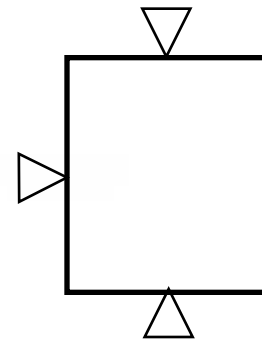
k зависит от вида закрепления нагруженных краев пластины.



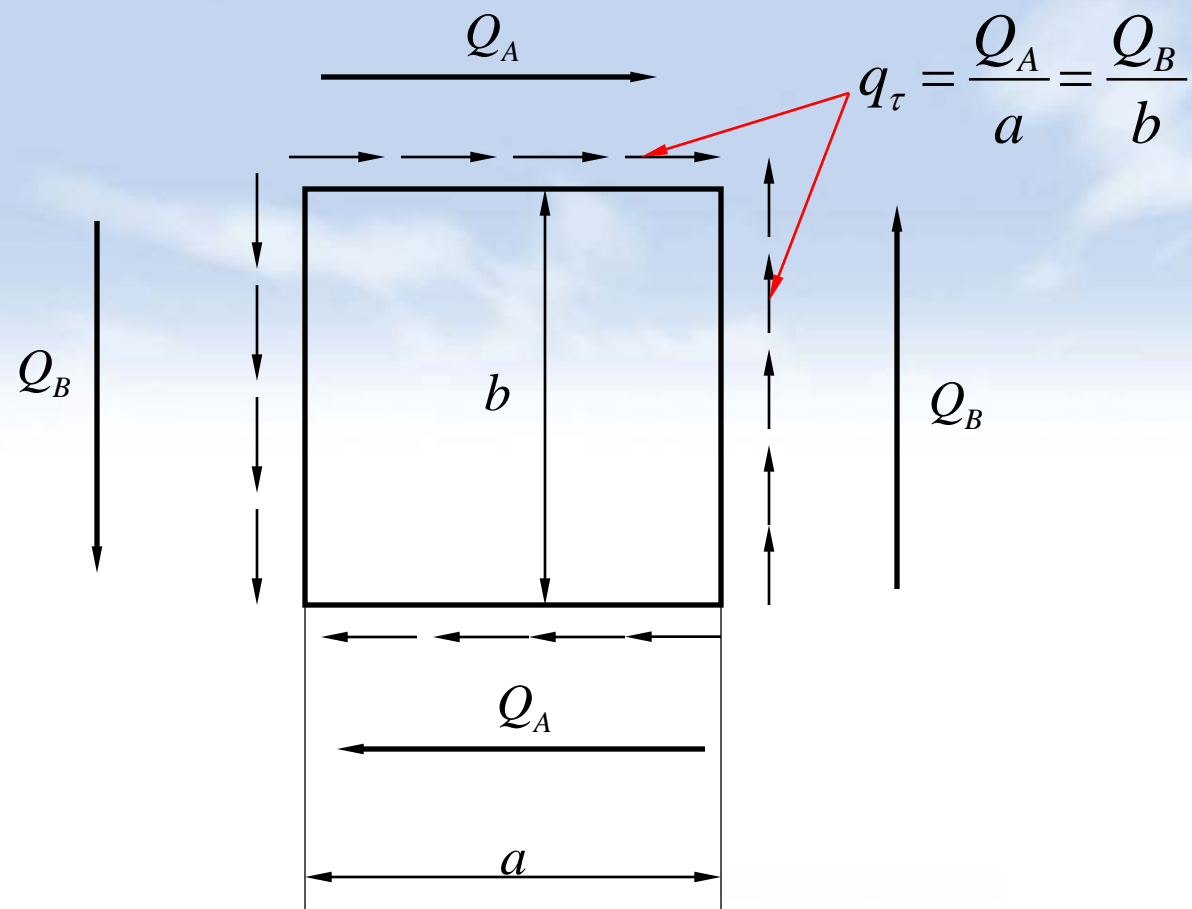
$$k = 6,3$$



$$k = 3,6$$



$$k = 0,4...0,9$$



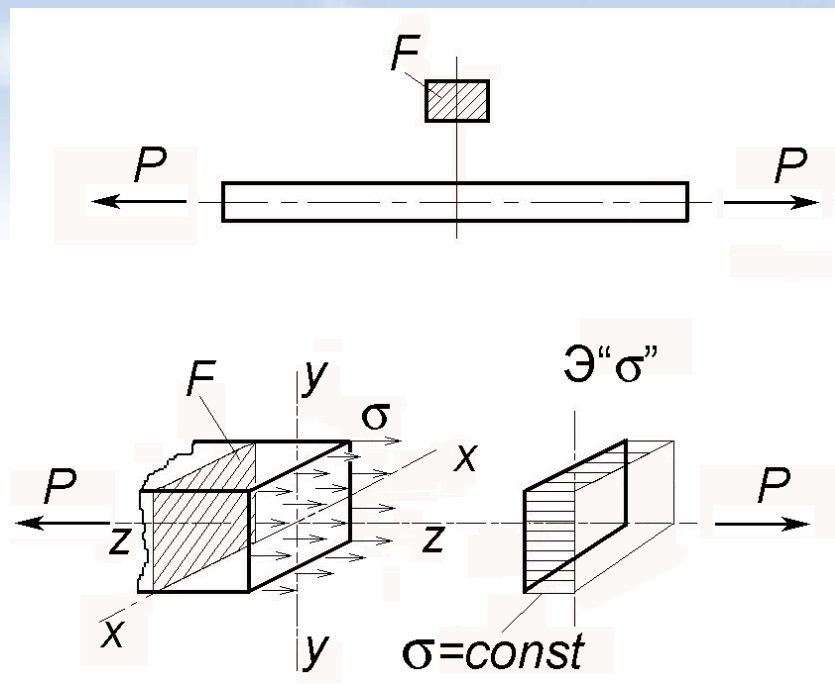
Для пластины $\tau_{крит} = \frac{0.9kE}{\left(\frac{b}{\delta}\right)^2}, k = 5,6 + \frac{3,8}{\left(\frac{a}{b}\right)^2}$

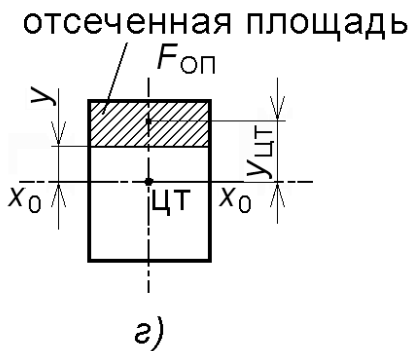
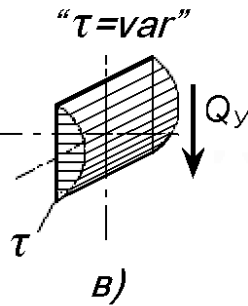
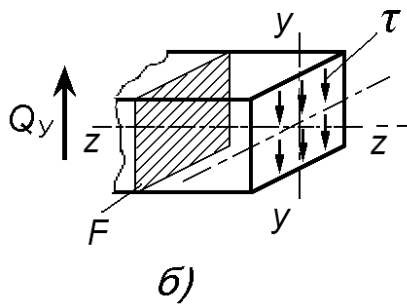
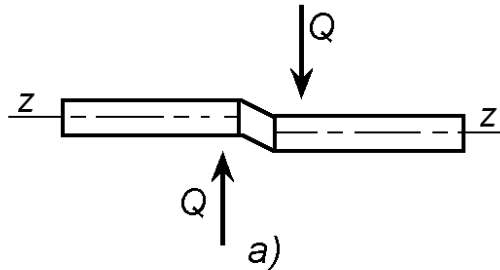
- 1) $b < a$, независимо от того, к какому краю пластины приложена нагрузка.
- 2). Величина $\sigma_{кр}$ не может быть больше σ_v .
- 3) Если $\sigma_{кр} \geq \sigma_{0.2}$, то теоретические формулы Эйлера **не применимы** и фактическое напряжение $\sigma_{кр}$ определяют по эмпирической формуле:

для $\tau_{кр}$.

$$\sigma_{кр.факт} = \sigma_v \frac{1 + \psi}{1 + \psi + (\psi)^2} , \text{ где } \psi = \frac{\sigma_v}{\sigma_{кр}} , \text{ то же аналогично}$$

Растяжение-сжатие





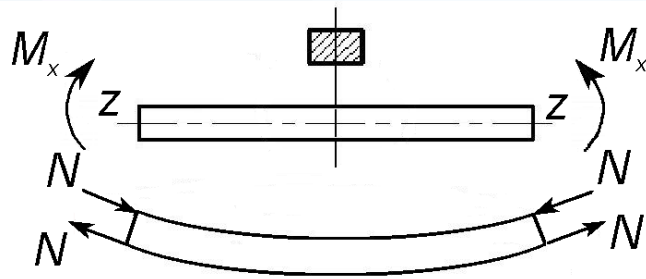
Сдвиг

$$\tau_y = \frac{QS_y}{Ib_y}$$

- $S_y = F_{o.п.} \cdot y_{ц.т.o.п.}$ - статический момент отсеченной площади сечения для координаты y , в которой рассчитывается напряжения сдвига);
- b_y – ширина сечения в этом месте;
- I – момент инерции всего сечения относительно оси x_0 , проходящей через ц.т. сечения.
- $y_{ц.т.o.п.}$ – координата ц.т. отсеченной площади сечения.

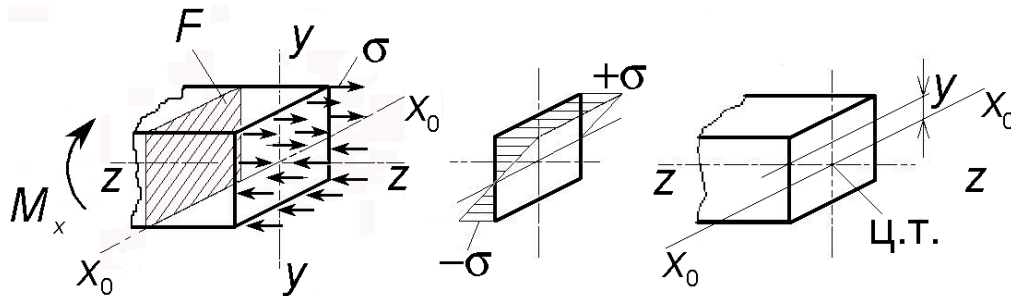
Изгиб

При действии изгибающего момента M одни слои сечения растягиваются, а другие – сжимаются. σ изг y в слое, лежащем на координате y от нейтральной оси, рассчитывают по формуле:



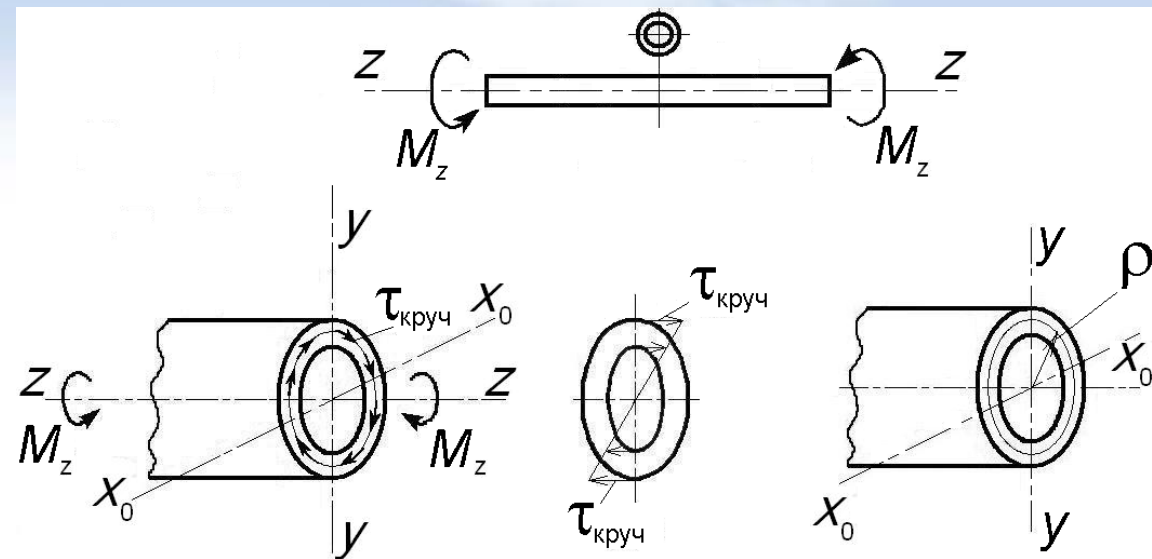
$$\sigma_{\text{изг } y} = \frac{M}{W_y}$$

$W_y = I/y$ – момент сопротивления



Кручение

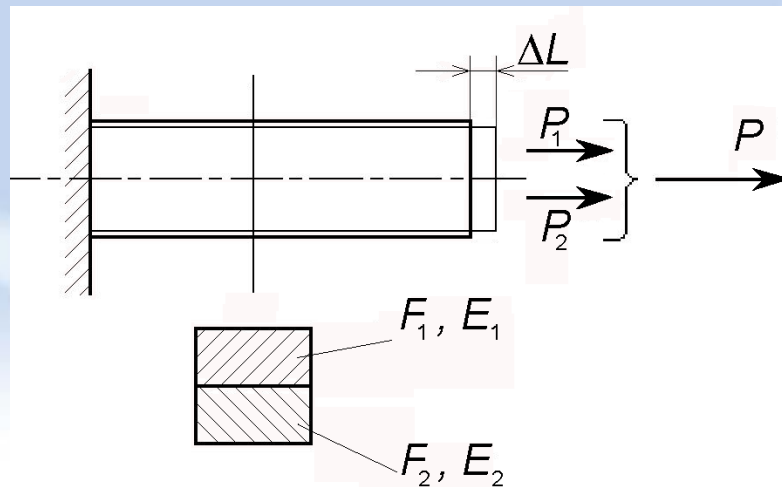
При кручении в плоскости сечения возникают касательные напряжения сдвига, величина которых зависит от удаления точки, где определяются эти напряжения, от центра жесткости сечения.



$$\tau_{\text{круч}} = \frac{M_{\text{круч}}}{W_p}$$

$M_{\text{круч}}$ – крутящий момент в сечении, W_p – полярный момент сопротивления в точке расчета, ρ – расстояние от ц.т. до точки сечения, где определяется $\tau_{\text{круч}}$.

Разрушение сечения произойдет при достижении величины напряжения в данной точке, равного $\tau_{\text{в}}$, либо величины критического напряжения $\tau_{\text{крит}} < \tau_{\text{в}}$.



Величина ΔL – общая для обоих материалов. Напряжения в первом материале $\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1$, во втором - $\sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2$.

$$P_1 = \sigma_1 \cdot F_1 ; P_2 = \sigma_2 \cdot F_2 . \text{ При этом } P_1 + P_2 = P$$

$$\varepsilon_1 = \frac{P_1}{E_1 \cdot F_1} , \varepsilon_2 = \frac{P_2}{E_2 \cdot F_2} \quad \text{тогда} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{E_1 \cdot F_1}{E_2 \cdot F_2}$$

EF – характеристика жесткости сечения при растяжении.

GF – характеристикой жесткости сечения при сдвиге.

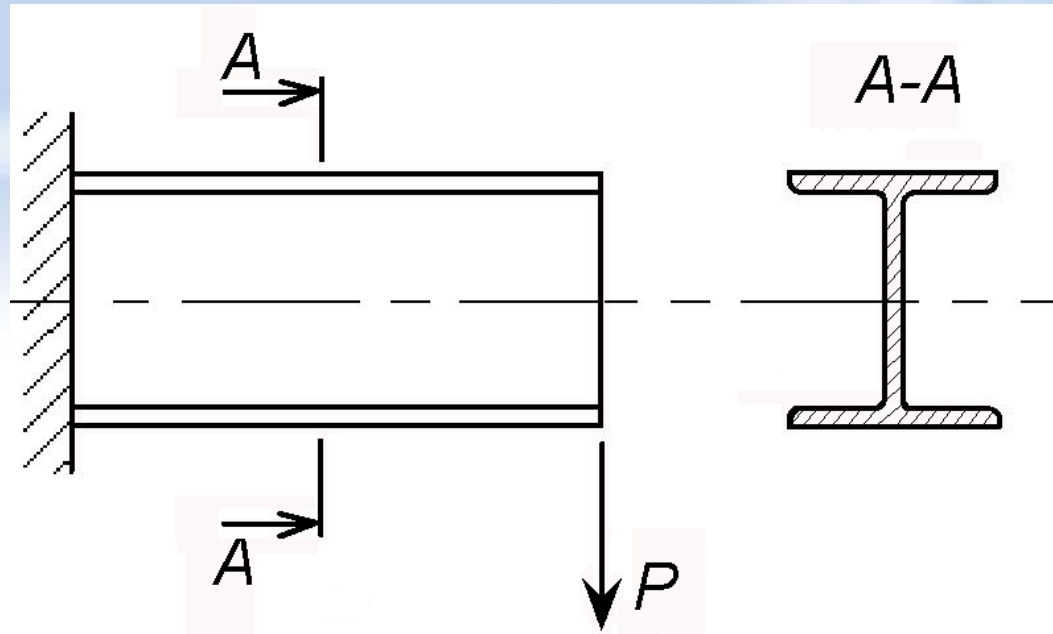
EI – характеристика жесткости сечения при изгибе.

Gl_p – характеристика жесткости сечения при кручении.

Нагрузка распределяется пропорционально жесткости детали (конструкции), соответствующей этому виду нагружения.

Более жесткий элемент конструкции воспринимает и большую долю нагрузки.

Какая часть сечения балки больше воспринимает сдвиг, а какая изгиб?



Чем больше жесткость элемента конструкции, тем меньше его деформация при одинаковой величине нагрузки

Деформация связана с напряжением через коэффициент пропорциональности E ($\sigma = E\varepsilon$), то есть, если известен материал конструкции и деформация сечения детали, то можно узнать и напряжения в этом сечении.

И наоборот, если знаем напряжения, то можем узнать и деформацию.

ЧТО ДОЛЖЕН ЗНАТЬ И УМЕТЬ ИНЖЕНЕР-КОНСТРУКТОР

- знать функциональное назначение и особенности работы всех деталей конструкции;
- уметь связывать детали в конструктивно-силовую схему (КСС) узлов и агрегатов планера самолета;
- знать и уметь применять существующие методики расчета на прочность;
- грамотно выбирать материалы и технологические процессы для изготовления конкретных деталей, соединений, узлов и агрегатов конструкций;
- учитывать особенности эксплуатации конструкции и защищать ее от неблагоприятных воздействий.
- твердо усвоить и понимать алгоритм конструирования.

The content of that document is the property of ECAR. It is confidentially provided and the industrial secret related to its content must be protected. In any case, it cannot be used to other purpose that the one it is provided to and all information of its content cannot be disseminated to non authorised people. It cannot be partially or globally reused without the written approval of ECAR.