



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ -  
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА**

---

---



**Профессор Ерохин М.Н.  
Ассистент Грибкова Е.В.**

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

**Основные требования к металлоконструкциям регламентированы ГОСТ-28609.**

**Конструкция должна иметь:**

- ❖ достаточную прочность, жесткость и устойчивость;
- ❖ надежность и долговечность;
- ❖ экономичность при изготовлении;
- ❖ защиту от коррозии;
- ❖ хороший доступ для контроля и очистки;
- ❖ отсутствие мест сбора влаги;
- ❖ хорошее проветривание.

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

При выборе материала для изготовления и ремонта металлоконструкций необходимо руководствоваться техническими условиями:

**УК-36.24-100-97 «Металлоконструкции грузоподъемных машин, оборудования и подъемников. Капитальный ремонт».**

Широко используется прокат в виде листов, полос, уголков, швеллеров, двутавров, труб и др. из:

- сталей обыкновенного качества;
- низколигированных сталей;
- алюминиевых сплавов

# СТАЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

В основном применяется сталь обыкновенного качества группы В. Она имеет гарантии как по механическому, так и химическому составу.

## Основная марка – сталь ВСт3.

Она обладает высокими механическими (прочность, ударная вязкость) и технологическими (свариваемость) свойствами.

Различают:

- ❖ сталь спокойную (ВСт3<sub>сп</sub>)
- ❖ полуспокойную (ВСт3<sub>пс</sub>)
- ❖ кипящую (ВСт3<sub>кп</sub>).

Стали (ВСт3<sub>сп</sub>) и (ВСт3<sub>пс</sub>) – для несущих элементов.

Стали (ВСт3<sub>пс</sub>) и (ВСт3<sub>кп</sub>) – для вспомогательных элементов.

Стали марок 10 и 20 применяют для конструкций из трубчатых элементов.

## **НИЗКОЛИГИРОВАННЫЕ СТАЛИ**

марок 09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 14Г2АФ, 14Г2АФД.

### **Достоинства сталей.**

Они обладают высокими значениями предела текучести и временного сопротивления, менее склонны к хрупкому разрушению при пониженных температурах, повышенной стойкостью против коррозии.

В условиях агрессивных сред рекомендуется применять стали с добавкой меди, повышающей их коррозионную стойкость.

### **Недостатки сталей.**

Более дороги и более чувствительны к концентрации напряжений при действии переменных нагрузок

# АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Для изготовления металлоконструкций применяют легкие сплавы на основе алюминия и магния.

Для основных элементов АМг6 и АМг5.

Для вспомогательных элементов АМг2 и АМп (алюминий + марганец).

## **Достоинства сплавов:**

малая плотность (2,8...3 раза меньше чем у стали);

высокая механическая прочность (близка к прочности стали Ст3);

высокая коррозионная стойкость; стабильность механических свойств при низких температурах (до  $-65^{\circ}\text{C}$ ).

Использование легких сплавов позволяет существенно снизить массу кранов, что приводит к уменьшению давления на колеса, снижению мощности механизма передвижения, к увеличению производительности крана.

## **Недостатки сплавов:**

малый модуль упругости ( $\approx 7 \cdot 10^4$  МПа), что снижает устойчивость элементов конструкции на сжатие;

высокий коэффициент линейного расширения, что приводит к увеличению температурных деформаций;

низкое значение предела выносливости  $\sigma_{-1}$ ;

стоимость алюминиевых сплавов примерно в 10 раз выше стоимости стали Ст3.

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Металлоконструкции рассчитывают по методу предельных состояний. Предельными называются состояния при которых конструкция становится непригодной для дальнейшей эксплуатации.

*Для металлоконструкций установлено три вида предельных состояний*

**Первое** – потеря несущей способности при однократном нагружении максимальной нагрузкой. В этом случае проводят расчет на статическую прочность и устойчивость.

**Второе** – потеря несущей способности при многократном действии нагрузки за расчетный срок. Характерные отказы при этом - усталостное разрушение, нагрев, чрезмерный износ.

**Третье** – возникновение деформаций, нарушающих нормальную эксплуатацию крана. Работоспособность сохраняется, но снижается точность фиксации крана. В этом случае расчет проводят на ограничение деформаций.

# РАСЧЕТ ПО МАКСИМАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ (первое предельное состояние)

В основу обеспечения несущей способности положено условие

$$\Sigma \cdot Q_i \cdot n_i \leq A \cdot R \cdot m_o ,$$

$Q_i$  – возможные максимальные нагрузки и их комбинации в процессе эксплуатации;

$n_i$  – коэффициенты перегрузки нагрузок, обуславливаемые особенностями эксплуатации;

$A$  – геометрическая характеристика рассчитываемого элемента (площадь сечения, момент сопротивления);

$R$  – расчетное сопротивление материала элемента;

$m_o$  – коэффициент, учитывающий особые условия работы, степень ответственности рассчитываемого элемента.

**Нагрузки:** силы тяжести от груза, тележки, противовеса, элементов самой конструкции; натяжения канатов; динамические нагрузки; инерционные нагрузки при пусках и торможении.

# РАСЧЕТ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПО ДОПУСТИМЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

Рекомендуется для расчета металлоконструкций кранов, работающих в группах режимов А1...А3 (А4).

Суть расчета заключается в сравнении действующих напряжений с допустимыми

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_T}{n}$$

Действующие напряжения определяют при максимальных нагрузках и при неблагоприятном их сочетании.

Сжатые стержни проверяют на устойчивость по условному напряжению

$$\sigma_{сж} = \frac{F_p}{\varphi A} \leq [\sigma],$$

где  $F_p$  – расчетная сжимающая сила, Н;  $[\sigma]$ – допустимое нормальное напряжение, МПа;  $A$  – площадь поперечного сечения стержня, мм<sup>2</sup>;  $\varphi$  – коэффициент продольного изгиба, который зависит от гибкости стержня.

# РАСЧЕТ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ (второе предельное состояние)

Рассчитывают металлоконструкции кранов, работающих в группе режимов кранов А5 и выше.

По стандарту ВНИИПТМАШ СТО 24.09.-5821-01-93 «Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций». Расчет на сопротивление усталости проводят по формуле

$$\sigma_{\max} \leq \alpha_v \cdot R_v \cdot \gamma_v \cdot \gamma_c$$

где  $\sigma_{\max}$  – наибольшее напряжение растяжения (сжатия) в расчетном сечении;

$\alpha_v$  – коэффициент режима работы элемента;

$R_v$  – расчетное сопротивление усталости для выбранной марки стали с учетом группы соединения и степени концентрации напряжений;

$\gamma_v$  – коэффициент, учитывающий вид напряженного состояния и асимметрию действующих напряжений;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

# ПРОВЕРКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ НА ДОПУСТИМЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ (третье предельное состояние)

Цель расчета – ограничение деформаций или перемещений, которые могут повлиять на точность выполнения операций

$$f/L \leq \left[ f/L \right]$$

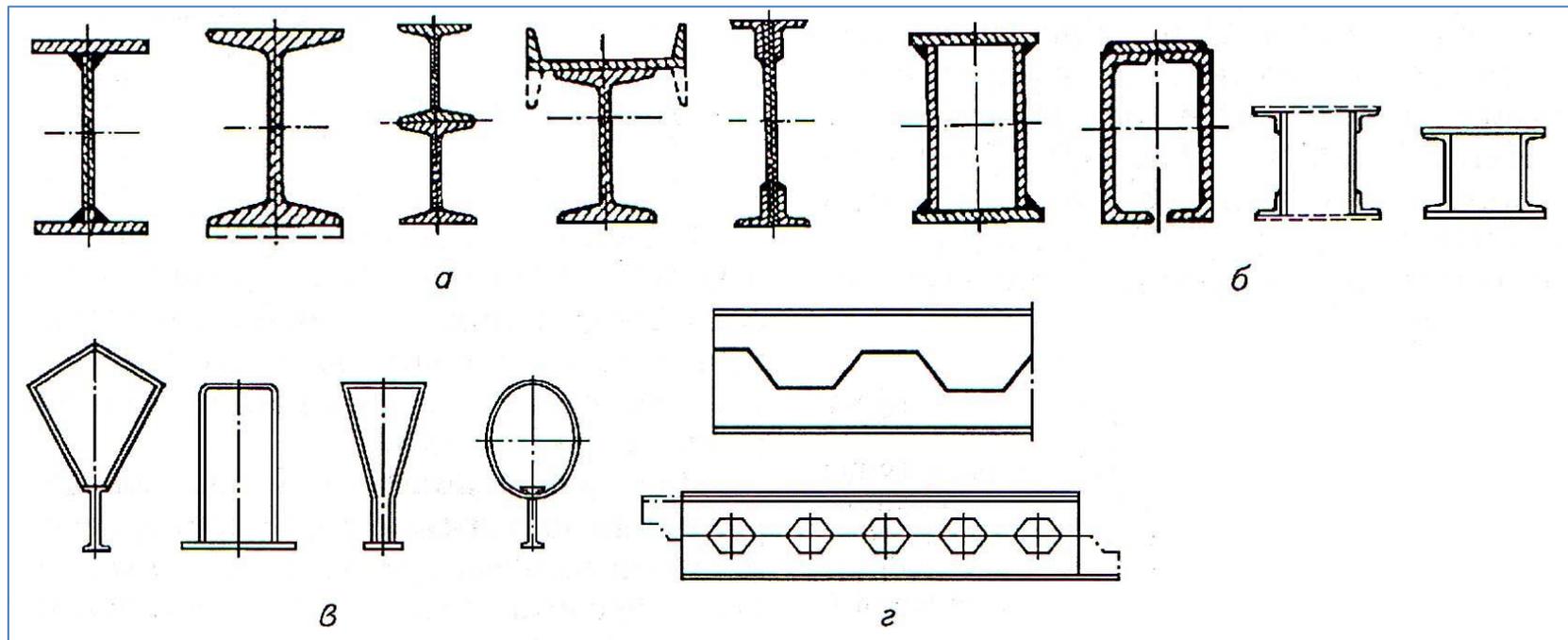
Для мостовых кран-балок с ручным приводом  $f/L = 1/400$ ,

С электрическим приводом  $f/L = 1/500$ .

Для мостов с механическим приводом  $f/L = 1/700$

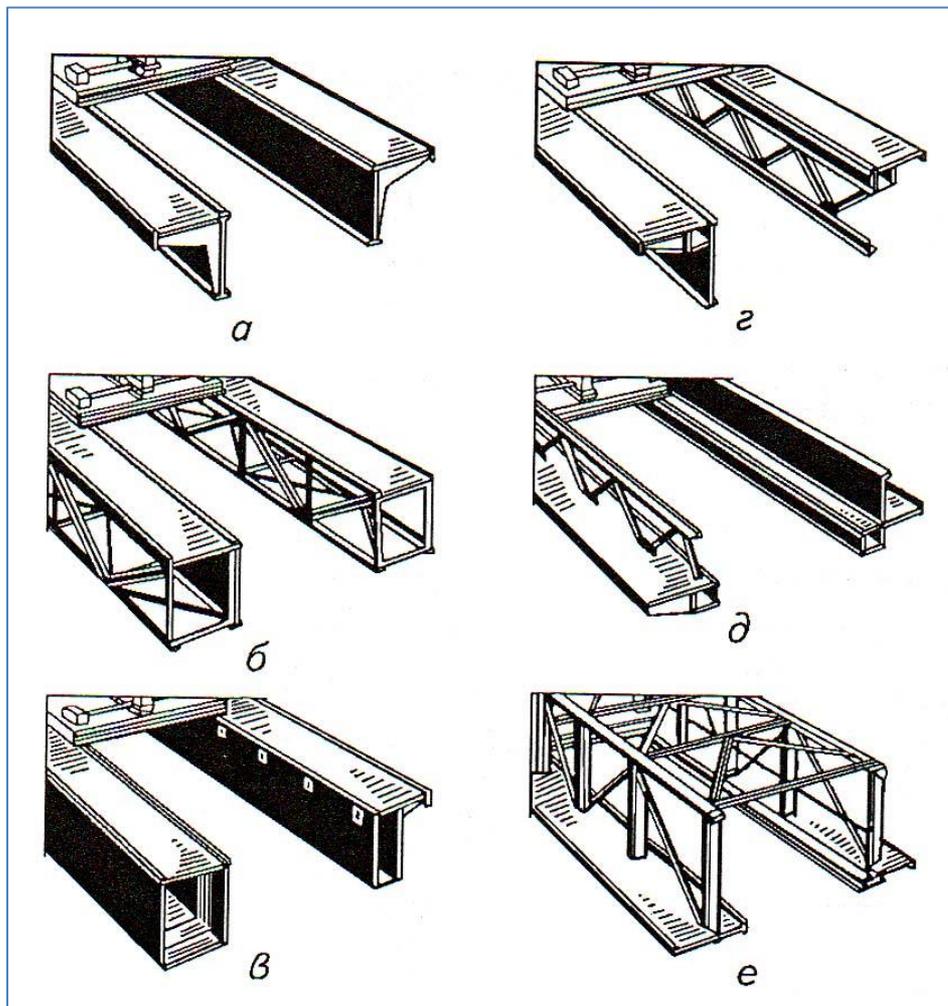
# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПРОЛЕТНОГО ТИПА

К металлоконструкциям пролетного типа относятся конструкции мостовых кранов, кран-балок и козловых кранов



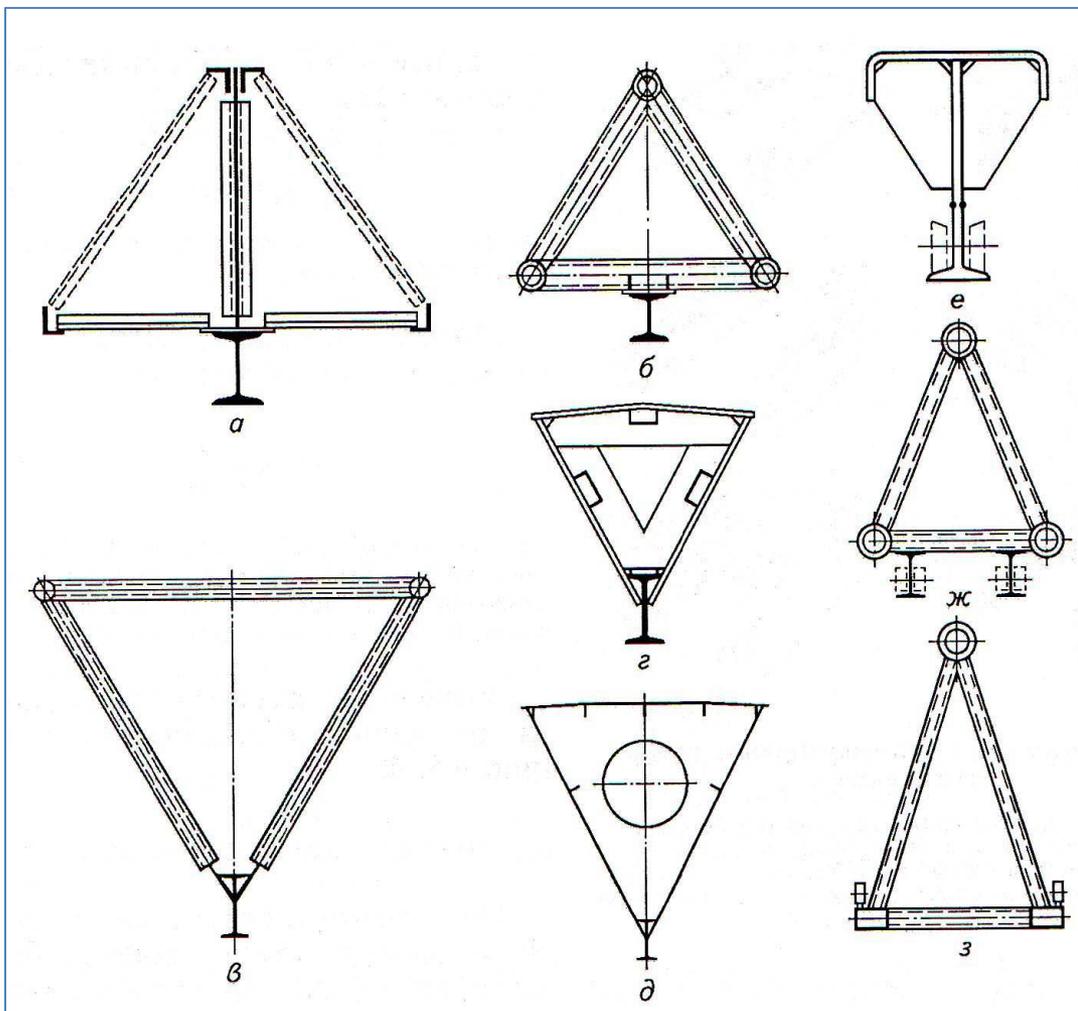
Типы сечений основных (несущих) балок: а – комбинация двутаврового типа; б – коробчатые сечения; в – сечения балок козловых кранов; г – вариант увеличения жесткости двутавра в результате раскроя и последующей сварки со сдвигом.

# ПРИМЕРЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ДВУХБАЛОЧНЫХ МОСТОВ



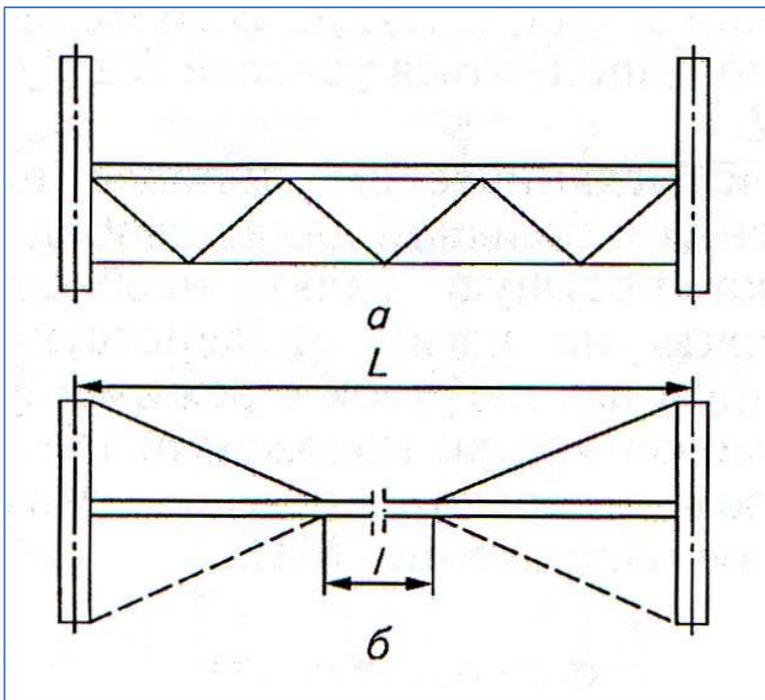
- а – угловая сплошностенная;
- б – коробчатая ферменная;
- в – с несимметричными коробчатыми балками;
- г, д – с балками, усиленными коробками;
- е – с открытой пространственной фермой

# ПОПЕРЕЧНЫЕ СЕЧЕНИЯ НЕСУЩИХ ФЕРМ КОЗЛОВЫХ КРАНОВ



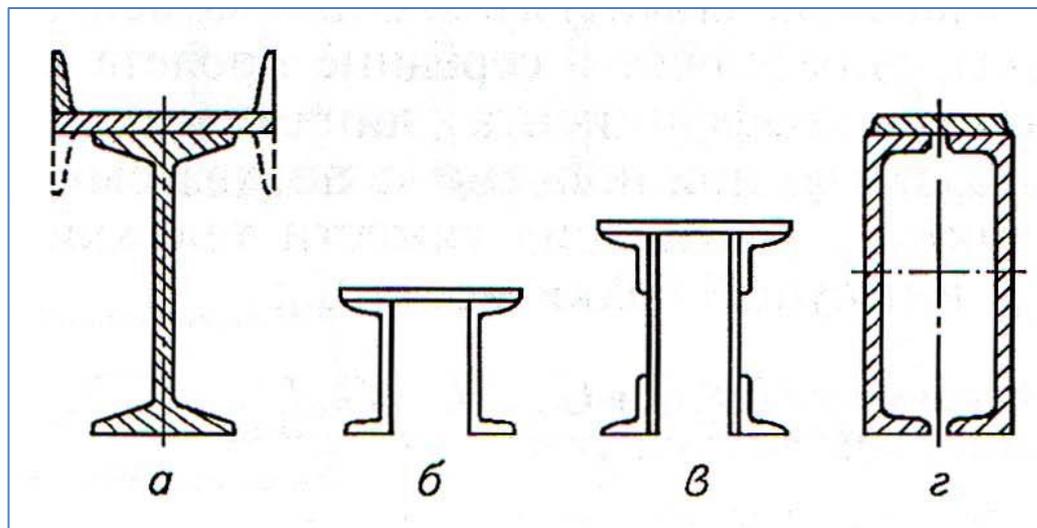
а – трехгранная конструкция из уголка с нижним расположением основания;  
б – трехгранная трубчатая конструкция с нижним расположением основания;  
в – трехгранная трубчатая конструкция с верхним расположением основания;  
г – трехгранная листовая конструкция с ребрами жесткости;  
д – трехгранная листовая конструкция с эллипсовидной трубой и ребрами жесткости;  
е – двутавровая конструкция с усилением;  
ж, з – трубчатые трехгранные конструкции для тележек с расставленными колесами

# ПРИМЕРЫ УСИЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ БАЛОК



Балки с элементами горизонтальной жесткости:

- а – за счет фермы;
- б – за счет раскосов;



Усиление зоны сжатия несущей балки:

- а – усиление двутавра швеллером или двутавром;
- б, в, г – варианты усиления сдвоенного швеллера полосой;

# РАСЧЕТ БАЛОК ПРОЛЕТНОГО ТИПА

Расчет сводится к определению момента сопротивления сечения балки в середине пролета относительно соответствующих осей

$$W_x = \frac{M}{\psi_\sigma [\sigma]}$$

из условия  $\sigma_u \leq [\sigma]$  ( $\psi$  - коэффициент гибкости балок).

По  $W_x$  выбирают номер профиля балки.

Максимальный изгибающий момент с учетом коэффициента динамичности нагрузки  $\psi$  при подъеме с подхватом

$$M = \frac{(\psi_\delta G + G_{\text{мел.}}) \cdot L}{4} + \frac{G_m \cdot L}{8}.$$

Сила тяжести моста  $G_m = q \cdot g \cdot L$ .

При механическом приводе движения и большой длине свободного участка балку проверяют на изгиб от действующих инерционных нагрузок в режиме пуска и торможения при положении тележки с грузом в середине пролета.

В этом случае

$$\sigma_u = \sigma_{ux} + \sigma_{uy} = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq [\sigma].$$

# РАСЧЕТ БАЛКИ НА ЖЕСТКОСТЬ

Жесткость оценивают по прогибу в середине пролета при номинальной нагрузке

$$f = \frac{M_x \cdot L^2}{10E \cdot I_x} \leq [f],$$

где  $E$  – модуль упругости материала балки, МПа:

для стали  $E = (2,1 \dots 2,15) \cdot 10^5$  МПа;

$I_x$  – момент инерции сечения, мм<sup>4</sup>;

$M_x$  – момент изгибающий, Н·мм;

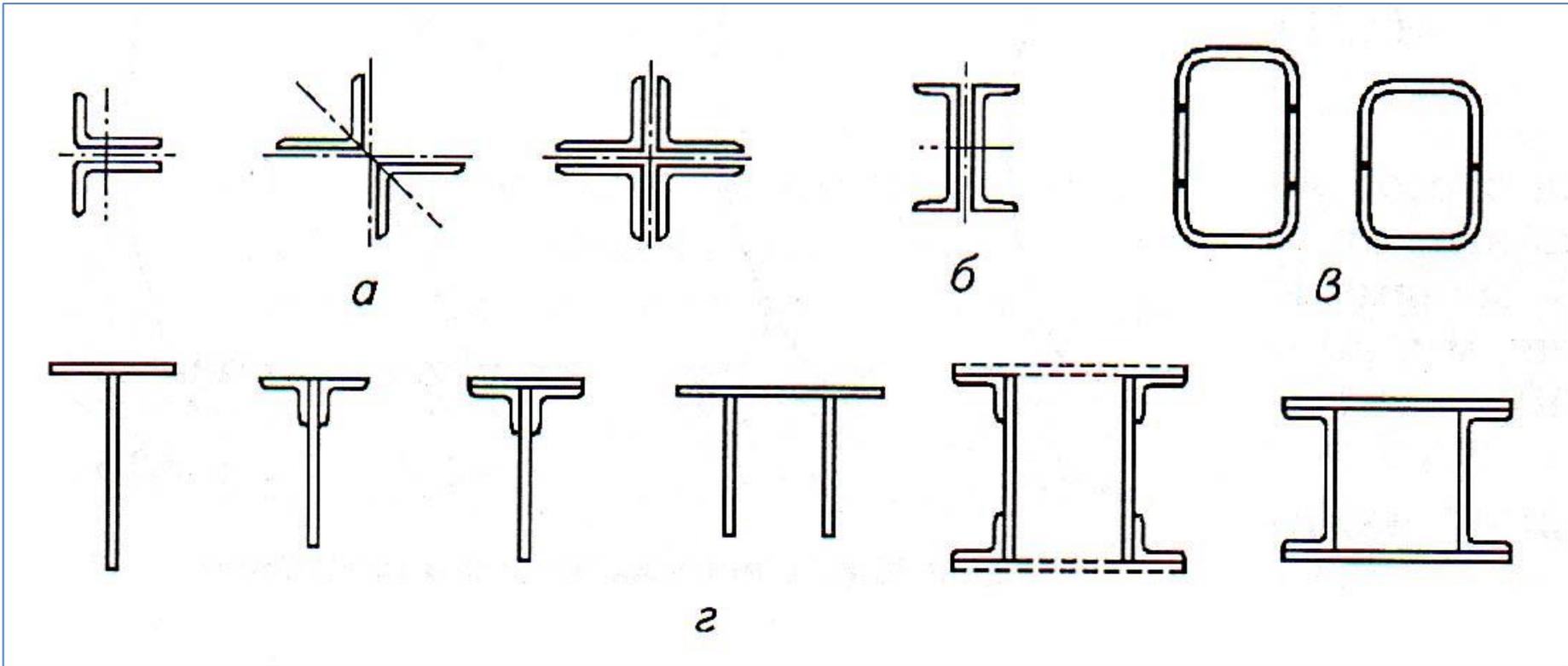
$L$  – длина балки, мм.

$$M_x = \frac{(G + G_{\text{тел.}}) \cdot L}{4}.$$

При пролете балок более 10 м для усиления горизонтальной жесткости применяют дополнительные раскосы. Эти элементы рассчитывают с учетом гибкости, принимают

$$\leq 25[\lambda]$$

# ТИПЫ СЕЧЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ СТРЕЛОВЫХ КРАНОВ



а – из уголков; б – сдвоенный швеллер; в – трубы прямоугольного сечения;  
г – сочетание уголка, полосы, швеллера.

# РАСЧЕТ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КОНСОЛЬНОГО ТИПА

В инженерной практике для кранов консольного типа небольшой грузоподъемности применяют упрощенный метод расчета. Пространственную конструкцию расчленяют на отдельные плоские системы и каждую из них рассматривают под действием сил, возникающих в соответствующих плоскостях.

Детали металлоконструкции могут испытывать деформации растяжения, сжатия и изгиба.

Вначале подбирают профиль нужного сечения, а затем рассчитывают элементы на прочность.

Обычно расчет выполняют по сжатому наиболее нагруженному стержню, исходя из условия устойчивости

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{r_{\min}} \leq [\lambda],$$

$\mu$  – коэффициент, учитывающий способ заделки стержня;

$l$  – расчетная длина сжатого участка стержня, мм;  $r_{\min}$  – минимальный радиус инерции сечения стержня, мм;  $[\lambda]$  – допустимая гибкость.

$$r_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}$$

# ПРОВЕРКА СТЕРЖНЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Стержни работающие на сжатие  $\sigma_{сж.} = \frac{F_{сж.}}{A} \leq \varphi[\sigma]$

Стержни, работающие на изгиб  $\sigma = \frac{M}{W_x} \leq [\sigma]$

Стержни, испытывающие изгиб и сжатие  $\sigma = \frac{M}{W_x} + \frac{F_{сж.}}{A\varphi} \leq [\sigma]$

С учетом эйлеровой силы  $F_{\text{Э}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{l^2}$

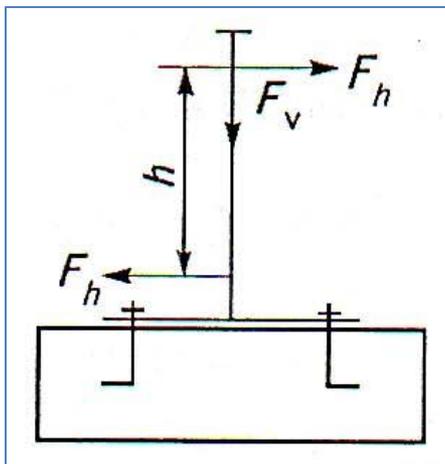
результатирующее напряжение  $\sigma = \frac{M}{W_x} + \frac{F}{A} + \frac{F_y}{W_x \left(1 - F/F_n\right)}$

Момент сопротивления общего сечения  $W_x = \frac{I_x}{Y_{\max}}$ ,

где  $I_X$  - момент инерции общего сечения относительно главной оси X;  
 $Y_{\max}$  - максимальное удаление точки сечения от главной оси X.



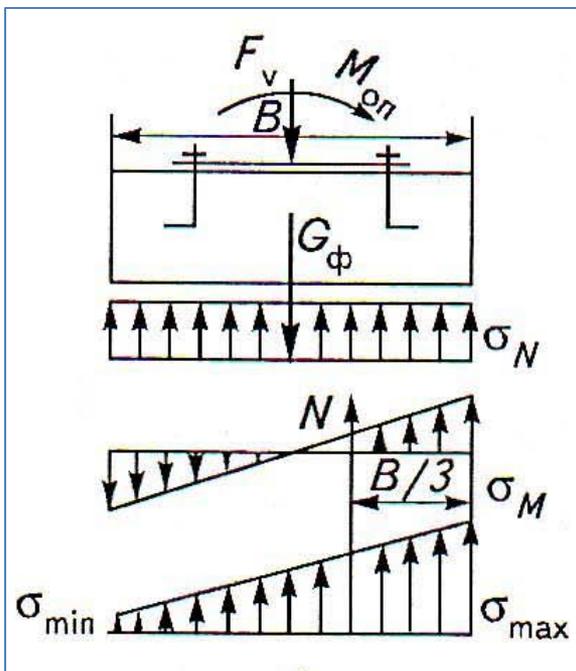
# РАСЧЕТ ФУНДАМЕНТА



$$F_v = G + G_k + G_{np}$$

$$M_{on} = F_h \cdot h; \quad M_e = M_{on} \cdot K_y$$

$$\sigma_{min} = \sigma_N - \sigma_M \geq 0; \quad \sigma_{max} = \sigma_N + \sigma_M \leq [\sigma_{cm}]$$

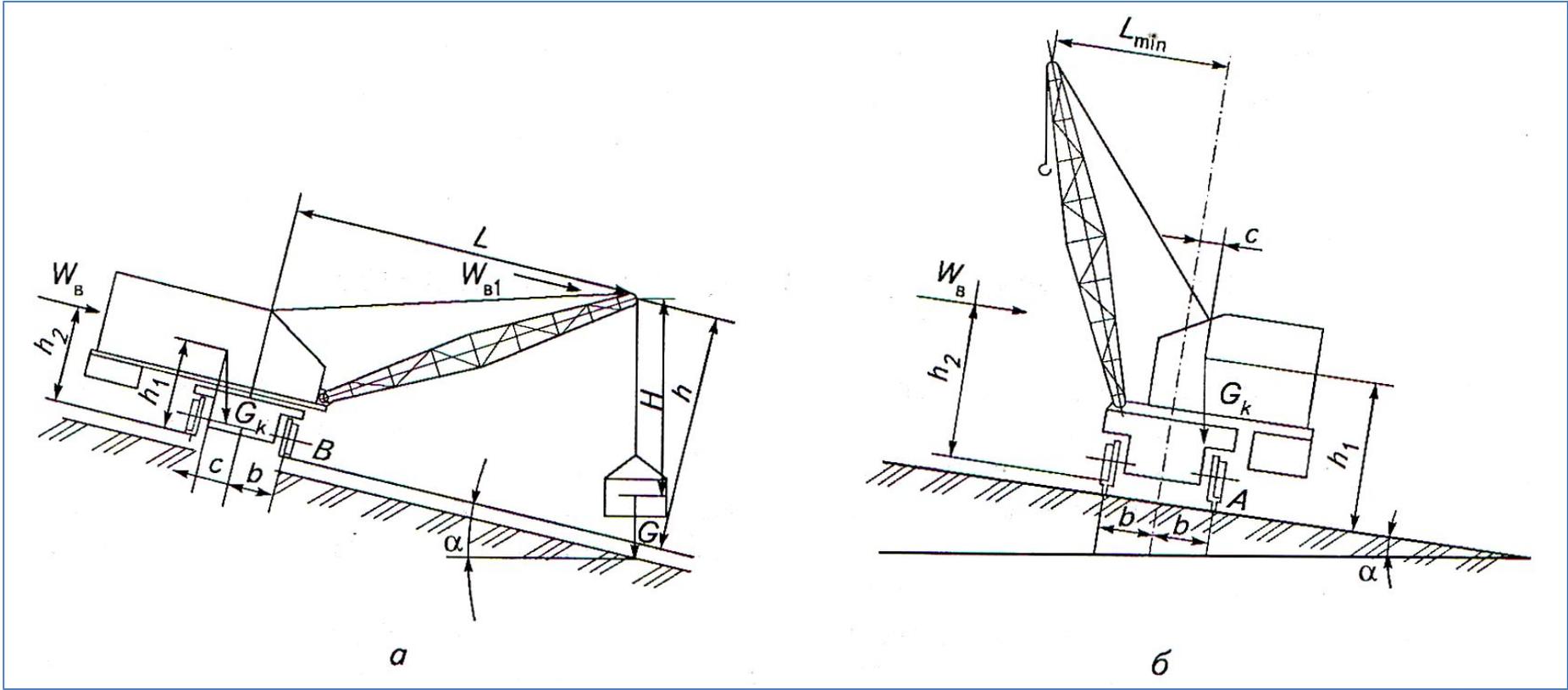


$$\sigma_N = \frac{(F_v + G_\phi)}{A} = \frac{N}{B^2}$$

$$\sigma_M = \frac{M_{on}}{W} = \frac{6F_h \cdot h}{B^3}$$

$$G_\phi = \frac{6 \cdot K_y \cdot F_h \cdot h}{B} - F_v; \quad B \geq 29 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_{on}}{[\sigma_{cm}]}}$$

# УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕДВИЖНЫХ КРАНОВ



$$K_{y1} = \frac{M_G - \sum M_{II} - M_{\epsilon}}{M_Q} \geq 1,15, \quad K'_{y1} = \frac{M'_G}{M_Q} \geq 1,4, \quad K_{y2} = \frac{M_G}{M_{\epsilon}} \geq 1,15.$$