

ЛЕКЦИЯ 6. БАЛКИ И БАЛОЧНЫЕ КЛЕТКИ.

План лекции:

1. Подбор сечения прокатных балок по двум предельным состояниям: по несущей способности и жесткости балки. Определение составного сечения балки;
2. Потеря общей и местной устойчивости стальных балок составного сечения. Условия местной и общей устойчивости. Соотношение ширины полок к высоте балки, высоты к длине. Ребра жесткости. Примеры конструирования
3. Типы и области рационального применения каждого типа балочной клетки. Выбор типа балочной клетки. Компоновка рабочих площадок сопряжения балок. Грузовая площадь. Особенности расчета.

Одним из наиболее распространенных элементов стальных конструкций является балка или элемент, работающий на изгиб.

Область применения балок в строительстве чрезвычайно широка: от небольших элементов рабочих площадок, междуэтажных перекрытий производственных или гражданских зданий до большепролетных балок покрытий, мостов, тяжело нагруженных подкрановых балок и так называемых «хребтовых» балок для подвески котлов в современных тепловых электростанциях. Пролеты мостовых балок достигают 150...200 м, а нагрузка на одну хребтовую балку котельного отделения ГРЭС при пролете до 45 м составляет $\sim 60 \cdot 10^3$ кН.



Балками называют конструктивные элементы сплошного сечения, работающие на изгиб.

Благодаря простоте и малой стоимости изготовления, удобной конструктивной форме, небольшой строительной высоте балки находят широкое применение в строительных конструкциях. Они применяются в различных перекрытиях, на рабочих площадках, эстакадах, мостах и других сооружениях.

Особенно широко применяются сплошные балки для относительно небольших пролетов при больших нагрузках.

Широкое распространение балок определяется простотой конструкции и надежностью в работе.

Балочные конструктивные формы технологичны при изготовлении, удобны при монтаже, не чувствительны к осадкам опор и температурным деформациям. Недостатком балочных конструкций является повышенный расход материала, однако использование мер по повышению эффективности делает их конкурентоспособными по отношению к другим конструктивным формам (фермы, рамы).

При больших пролетах и малых нагрузках наиболее рационально применение сквозных балок (ферм), так как получаемая в этом случае экономия металла является более существенной, чем увеличение трудоемкости изготовления.

Классификация балок.

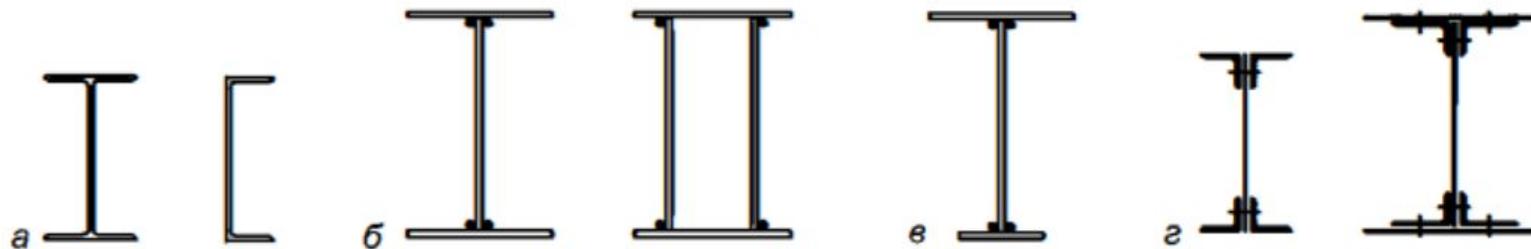
По типу сечения различают балки прокатные и составные. В качестве прокатных балок используют двутавры и швеллеры (рис. 9.2, а). Прокатные балки применяют для перекрытия небольших пролетов и в малонагруженных конструктивных элементах. В сравнении с составными балками прокатные балки более металлоемки, но менее трудоемки в изготовлении.

Составные сварные балки применяют при больших нагрузках и пролетах. При небольших нагрузках и пролетах возможно применение гнутых профилей.

При наличии кроме вертикальной еще и горизонтальной нагрузки, приложенной к верхнему поясу, последний разгибают и получают балки несимметричного сечения. Такие балки называют моно-симметричными (рис. 9.2, в) в отличие от бисимметричных балок с двумя осями симметрии (рис. 9.2, б, г).

Балки бывают открытого (двутаврового) и замкнутого (чаще всего коробчатого) сечения (рис. 9.3).

Замкнутые сечения применяют при воздействии на балку значительных крутящих моментов (например, в подкрановых балках), когда предпочтительнее применение развитых в боковой плоскости сечений. Такие сечения применяют при монтаже, транспортировке и



*Рис. 9.2. Прокатные и составные сечения балок:
а – прокатные; б – составные сварные; в – клепаные и болтовые*

Балки бывают открытого (двутаврового) и замкнутого (чаще всего коробчатого) сечения (рис. 9.3). Замкнутые сечения применяют при воздействии на балку значительных крутящих моментов (например, в подкрановых балках), когда предпочтительнее применение развитых в боковой плоскости сечений (см. рис. 9.3). Балки замкнутого сечения более устойчивы при транспортировке и монтаже.



Рис. 9.3. Балки замкнутого сечения

По способу изготовления

различают балки прокатные, сварные, болтовые или клепанные (см. рис. 9.2). Составные балки изготавливают из листового или фасонного проката (см. рис. 9.2, б, в, г), которые соединяют сваркой или на болтах и заклепках.

По статической схеме различают однопролетные {разрезные}, многопролетные {неразрезные} и консольные балки.

Разрезные балки (рис. 9.4, а) проще неразрезных в изготовлении и монтаже, они нечувствительны к осадкам опор.

Неразрезные балки (рис. 9.4, б, г) сложнее в изготовлении и монтаже, однако более экономичны по расходу стали (на 10-12 %). Эти балки разумно применять при надежных основаниях, когда нет опасности перегрузки балок вследствие резкой разницы в осадке опор.

В многопролетных консольных балках (рис. 9.4, г) консоли разгружают пролетные сечения балок и тем самым повышают экономические показатели последних.



По материалу балки могут быть:

- моностальные, выполненные из одной марки стали;
- дистальные, выполненные из двух марок стали: пояс - из более прочного металла, стенка - из менее прочного;
- полистальные - с применением трех-четырех марок стали, например, в неразрезных балках;
- из алюминиевых сплавов;
- комбинированные сталежелезобетонные (железобетонная плита включена в совместную работу с балкой).

По конструктивному решению различают

- балки с гофрированной стенкой;
- балки с перфорированной стенкой;
- балки с предварительным напряжением.

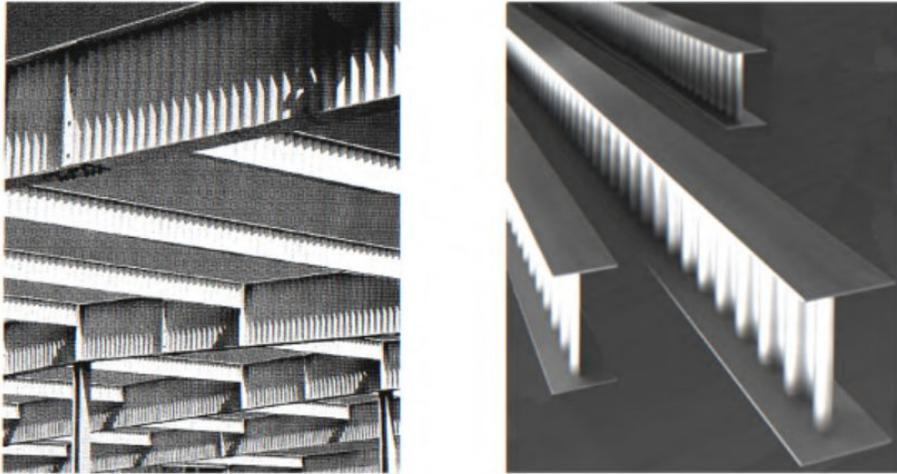


Рис. 9.5. Балки с гофрированной стенкой

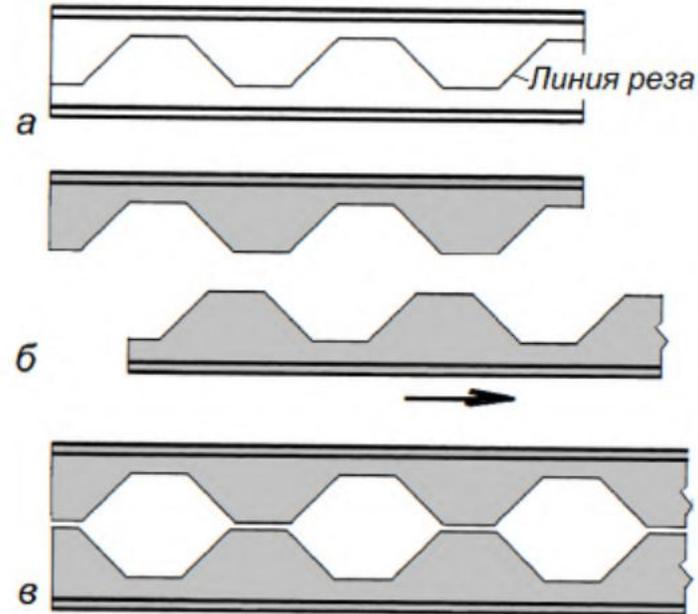


Рис. 9.6. Схема изготовления балки с перфорированной стенкой

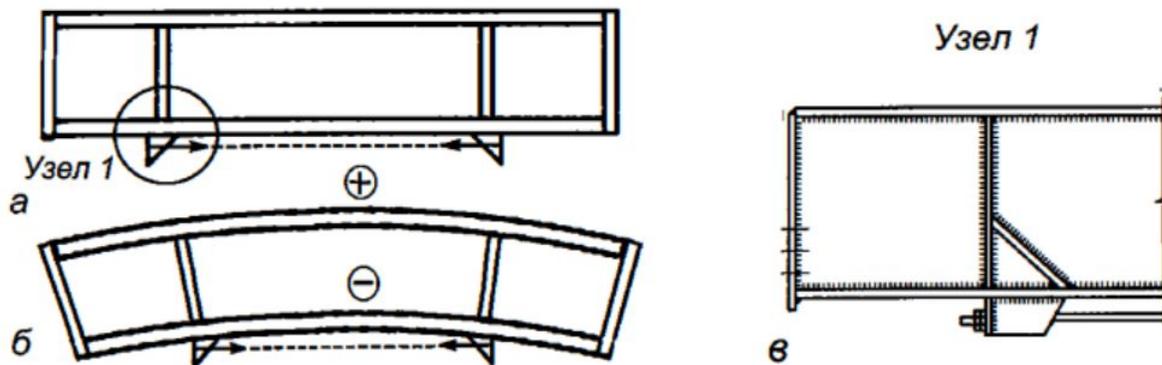
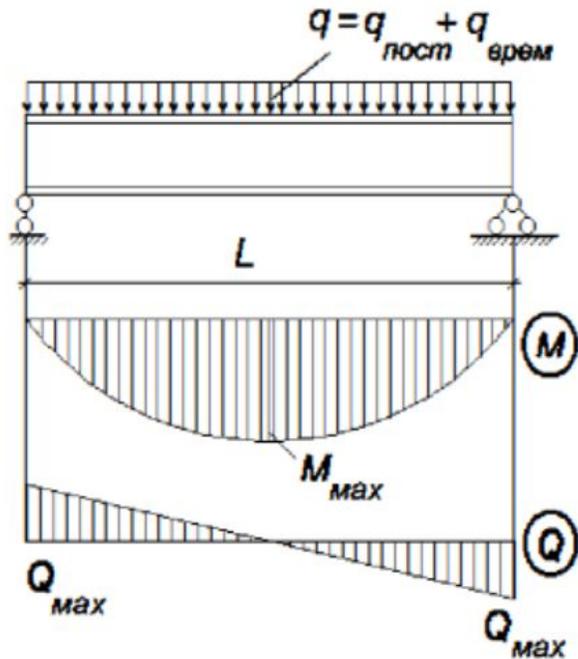


Рис. 9.7. Предварительно напряженная балка

Прокатные балки.

Прокатные балки имеют ограниченную несущую способность, что связано с имеющейся номенклатурой выпускаемых прокатных профилей. Их применяют для перекрытия небольших пролетов в балочных клетках, в конструкциях перекрытий и покрытий гаражей, складских помещений; в качестве прогонов покрытий производственных зданий; в конструкциях эстакад, мостов и многих других инженерных сооружениях.

В сравнении с составными балками прокатные балки более металлоемки за счет увеличенной толщины стенки (по условиям прокатки), но менее трудоемки в изготовлении и более надежны в эксплуатации. Стенки прокатных балок не требуют укрепления их ребрами жесткости, за исключением опорных зон и зон приложения значительных сосредоточенных нагрузок. Отсутствие сварных швов в областях контакта полок со стенкой существенно уменьшает концентрацию остаточных напряжений.



Подбор сечения прокатных балок.

Исходными данными для подбора сечения прокатной балки являются компоновочные размеры (пролет и шаг балок), нагрузки (постоянные и временные), а также дополнительные факторы. К дополнительным факторам относят условия эксплуатации, виды опор, раскрепление связями и распорками. В результате формируют расчетную схему балки и определяют места приложения и интенсивность нагрузок. В общем виде расчет балок можно представить следующим алгоритмом:

- компоновка - анализ предполагаемой конструктивной схемы сооружения или его фрагмента, определение пролета, шага;
- определение нагрузок с учетом возможных их сочетаний. При определении нагрузки следует учесть собственный вес балки, введя коэффициент 1,05 (5 % от суммарных нагрузок);
- выбор расчетной схемы;
- статический (в особых случаях динамический) расчет с определением максимальных значений усилий (M_{max} , Q_{max}) в характерных сечениях
- подбор сечения балки;
- проверка принятого сечения на прочность, устойчивость и жесткость.

При изгибе балки в одной плоскости и упругой работе стали прокатный профиль определяют по значению требуемого момента сопротивления:

$$W_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{max}}}{R_y \gamma_c},$$

В соответствии с принятым типом сечения (двутавр, швеллер и др.) по сортаменту выбирают ближайший больший номер профиля, у которого $W > W_{\text{тр}}$.

При благоприятных условиях уменьшают размеры сечения за счет учета развития пластических деформаций.

В нормах проектирования СП 16 такой расчет предусмотрен для разрезных балок из стали с пределом текучести до 440 МПа, несущих статическую нагрузку, если касательные напряжения в месте действия максимального момента (кроме опорных сечений) не превышают $\tau < 0,9R_s$.

В этом случае подбор сечения (определение требуемого момента сопротивления) выполняют по формуле

$$W_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{max}}}{c_x \beta R_y \gamma_c}$$

где c_x - коэффициент, принимаемый равным $c_x = 1,12$ в первом приближении, а затем, в процессе проверки прочности, уточняемый по табл. Е1 СП 16

β - коэффициент, определяемый по табл. 1

Подобрав по сортаменту ближайший больший профиль, выполняют проверки несущей способности и деформативности балки по первой и второй группам предельных состояний. Проверки следует выполнять по уточненным нагрузкам и фактическим геометрическим характеристикам сечений.

При $\tau_x \leq 0,5R_s$	$\beta = 1$
При $0,5R_s < \tau_x \leq 0,9R_s$	$\beta = 1 - \frac{0,20}{\alpha_f + 0,25} \left(\frac{\tau_x}{R_s} \right)^4$
Где $\alpha_f = A_f / A_w$ – отношение площади сечения пояса A_f к площади сечения стенки A_w .	

Проверки прочности прокатных балок.

Проверки прочности выполняют в точках, где развиваются наибольшие нормальные или касательные напряжения. Эти напряжения при равномерно распределенной нагрузке на балку действуют в разных сечениях, поэтому проверки максимальных нормальных и касательных напряжений выполняют отдельно. В некоторых случаях проверки прочности выполняют в точках приложения больших сосредоточенных внешних сил, где одновременно развиваются нормальные, касательные и местные (локальные) напряжения. Они способны при совместном действии вызвать переход стали в пластическую стадию.

Проверку прочности выполняют в сечении, где действует максимальный изгибающий момент:

$$\frac{M_{\max}}{W_{n,\min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

Однако если сечение подобрано путём выбора ближайшего большего двутавра, то проверку прочности не выполняют.

Обычно стенка прокатного элемента достаточно толстая и проверки прочности от действия поперечной силы не требуется. Однако в некоторых случаях эта проверка необходима и ее выполняют по формуле

$$\frac{Q_{\max} S_{\text{полу сечения}}}{I_t R_s \gamma_c} \leq 1$$

При учете развития пластических деформаций проверку на прочность при действии момента выполняют по формуле

$$\frac{M_x}{c_x \beta W_{xn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

при $Q_x/A_w < 0,9R_s$ (кроме опорных сечений).

В опорном сечении балок, рассчитываемых с учетом пластических деформаций, расчет прочности выполняют по формуле

$$\frac{Q_x}{A_w R_s \gamma_c} \leq 1$$

В случае изгиба в двух главных плоскостях (косого изгиба) расчет прочности балки при действии моментов в двух плоскостях выполняют по формуле

$$\frac{M_x}{I_{xn} R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_{yn} R_y \gamma_c} x \leq 1$$

где x и y - расстояния от главных осей до рассматриваемой точки сечения.

С учетом развития пластических деформаций в сечении балки при $\tau_y = Q_y / (2Af) < 0,5R_s$ расчет выполняют по формуле, анало-

$$\frac{M_x}{c_x \beta W_{xn, \min} R_y \gamma_c} \pm \frac{M_y}{c_y W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1$$

Если проверки на прочность не удовлетворяются, то необходимо принять больший профиль по сортаменту и вновь выполнить все проверки.

Проверка общей устойчивости прокатных балок

Проверку общей устойчивости балок выполняют по формуле

$$\frac{M_x}{\varphi_b \cdot W_{сж} \cdot R_y \gamma_c} \leq 1$$

где φ_b - коэффициент устойчивости при изгибе балок, определяемый по прил. Ж СП 16;
 $W_{сж}$ - момент сопротивления сжатого пояса балки. Устойчивость балок, работающих в упругом состоянии, а также бистальных балок, работающих с развитием пластических деформаций в части сечения (упругопластическое состояние), следует считать обеспеченной в следующих случаях:

1. при передаче нагрузки через сплошной жесткий настил (железобетонные плиты, плоский или профилированный металлический настил и т.п.), непрерывно опирающийся на сжатый пояс балки и надежно с ним связанный с помощью сварки, самонарезающих винтов и др. (при этом силы трения учитывать не следует);
2. при значениях условной гибкости сжатого пояса балки, не превышающих ее предельных значений, определяемых по формулам табл. 2

$$\bar{\lambda}_b = (l_{ef} / b) \sqrt{R_{yf} / E} \leq \bar{\lambda}_{ub}$$

Место приложения нагрузки	Условная предельная гибкость сжатого пояса прокатной или сварной балки $\bar{\lambda}_{ub}$
К верхнему поясу	$0,35 + 0,0032 b/t + (0,76 - 0,02 b/t) b/h$
К нижнему поясу	$0,57 + 0,0032 b/t + (0,92 - 0,02 b/t) b/h$
Независимо от уровня приложения нагрузки при расчете участка балки между связями или при чистом изгибе	$0,41 + 0,0032 b/t + (0,73 - 0,016 b/t) b/h$
Обозначения: b и t – ширина и толщина сжатого пояса; h – расстояние между осями поясных листов.	

Для балок с опорными сечениями, закрепленными от боковых смещений и поворота, расчетную длину балки принимают равной расстоянию между связями или распорками, препятствующими смещению сжатого пояса из плоскости балки.

Если проверка общей устойчивости балки не выполняется, следует прежде всего уменьшить ее расчетную длину постановкой распорок или связей.

Проверка жесткости прокатных балок

Прогибы балки не должны превышать предельных значений, установленных нормами проектирования в табл. Е1 СП 20

Формулы для вычисления максимальных прогибов от нагрузок для некоторых типов балок приведены в любом тематическом справочнике (справочники проектировщика, справочники по сопротивлению материалов).

Проверка жесткости (прогибов) изгибаемых элементов относится ко второму предельному состоянию, поэтому прогибы следует определять от нормативных нагрузок.

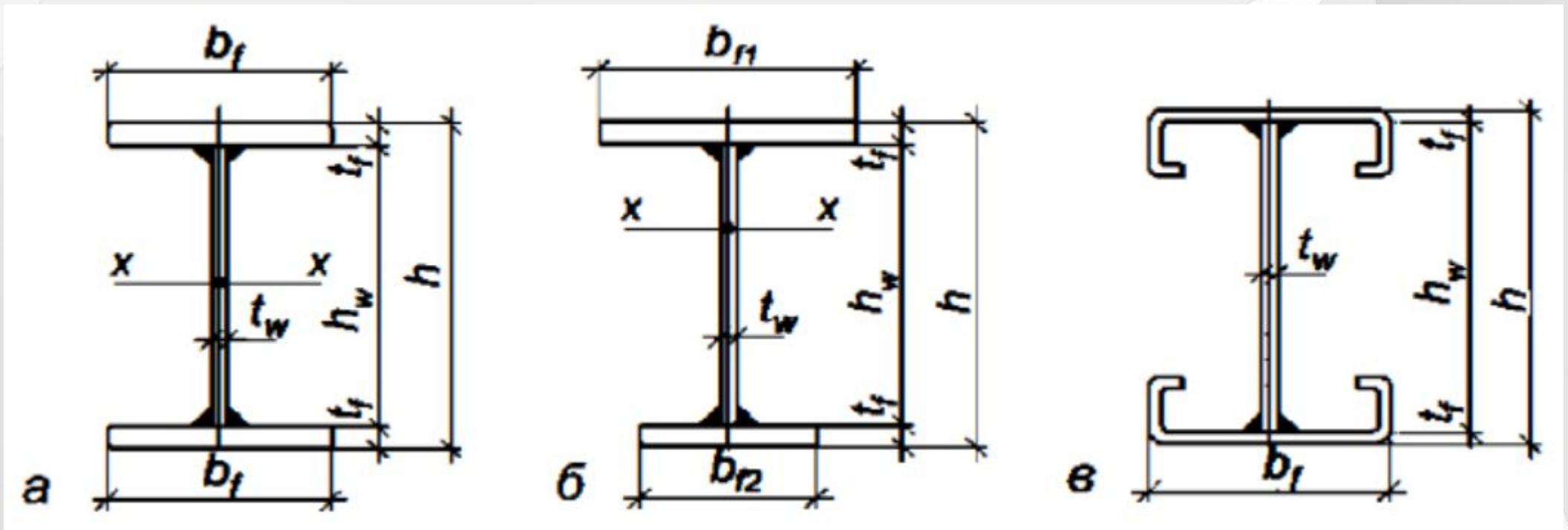
Ограничение прогиба обусловлено необходимостью создания условий нормальной работы технологического оборудования, обеспечения целостности примыкающих ограждающих конструкций и предотвращения неприятных физиологических воздействий на человека.

При невыполнении проверки жесткости необходимо увеличить сечение балки и снова определить прогиб от нагрузок.

Составные балки

Составные балки используют в тех случаях, когда требуются конструкции, жесткость и несущая способность которых превышает возможности прокатных профилей. Балки могут быть сварными, болтовыми или клепаными но последние применяют исключительно редко.

Наибольшее применение получили балки двутаврового сечения из трех элементов - верхнего и нижнего поясов, объединенных тонкой стенкой. Балки изготавливают симметричного а реже моносимметричного сечений. Перспективными являются двутавровые сечения, в качестве полок которого используют прокатные швеллеры или холодногнутые профили.



Подбор сечения составной балки

При подборе основных габаритов составного сечения балки учитывают следующие факторы:

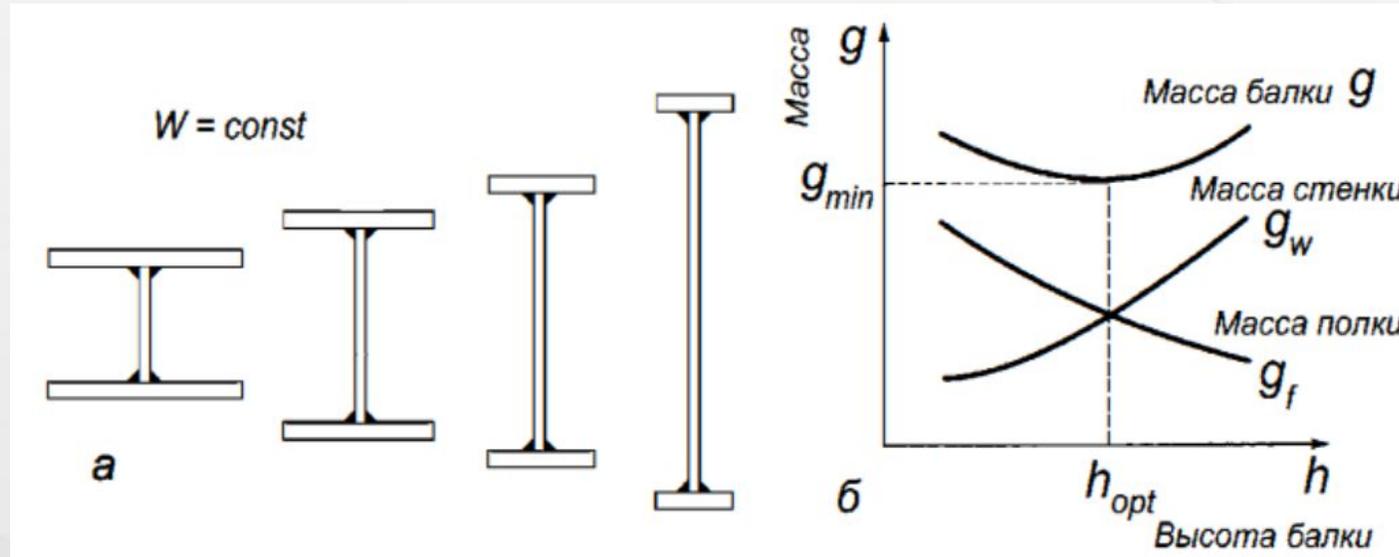
- прочность и надежность безотказной работы в течение всего запланированного срока эксплуатации конструкции;
- экономичность - балки должны иметь минимальную массу при необходимой несущей способности;
- жесткость - прогибы балок при их эксплуатации не должны превышать предельных значений, допускаемых нормами проектирования;
- конструктивные и технологические требования - балки должны отвечать конструктивным решениям зданий и сооружений, быть транспортабельными, технологичными в изготовлении и монтаже.

Подбор сечения составной балки выполняют в той же последовательности, что и для прокатных. Однако требуемый момент сопротивления, оказывается значительным и по нему не удастся подобрать прокатной профиль. При определении сечения сварной балки отдельно определяют высоту балки, размеры стенки и полка.

Обычно составные балки имеют высоту в пределах $1/8-1/12$ пролета, а ширину полка — $1/3-1/5$ высоты балки.

Определение оптимальной высоты балки.

Определение оптимальной высоты балки. Стоимость стали высока, поэтому прежде всего подбирают сечение балки из экономических соображений, но при обеспечении необходимой прочности. Для обеспечения прочности балка должна иметь необходимый момент сопротивления W . Однако с равными по величине моментами сопротивления $W = \text{const}$ можно изготовить сколько угодно балок с разными высотами и, следовательно, с различной массой.



Масса балки состоит из массы полок и массы стенок. С увеличением высоты балки масса поясов уменьшается, а масса стенок увеличивается. Аналитические выражения зависимости массы полок и стенки от высоты можно изобразить графически. Очевидно, что при определенных значениях масс полок и стенки масса всей балки будет наименьшей g_{\min} . Высоту балки, соответствующую минимальной массе, называют оптимальной h_{opt} .

Выражение для определения оптимальной высоты балки получают, приравняв нулю производную функции массы балки. Упростив это выражение, получаем:

$$h_{opt} = K \cdot \sqrt{W_{ip} / t_w}$$

где K - коэффициент, зависящий от конструктивного оформления балки. Для сварных балок $K = 1,15-1,2$; для балок с болтовым соединением полки и стенки $K = 1,2-1,25$;
 t - толщина стенки, ориентировочно принимаемая по табл. 3.

Рекомендуемые толщины и гибкости стенок при заданной высоте балок

h , мм	1000	1500	2000	3000	4000	5000
t_w , мм	8–10	10–12	12–14	16–18	20–22	22–24
λ_w	100–125	125–150	145–165	165–185	185–200	210–230

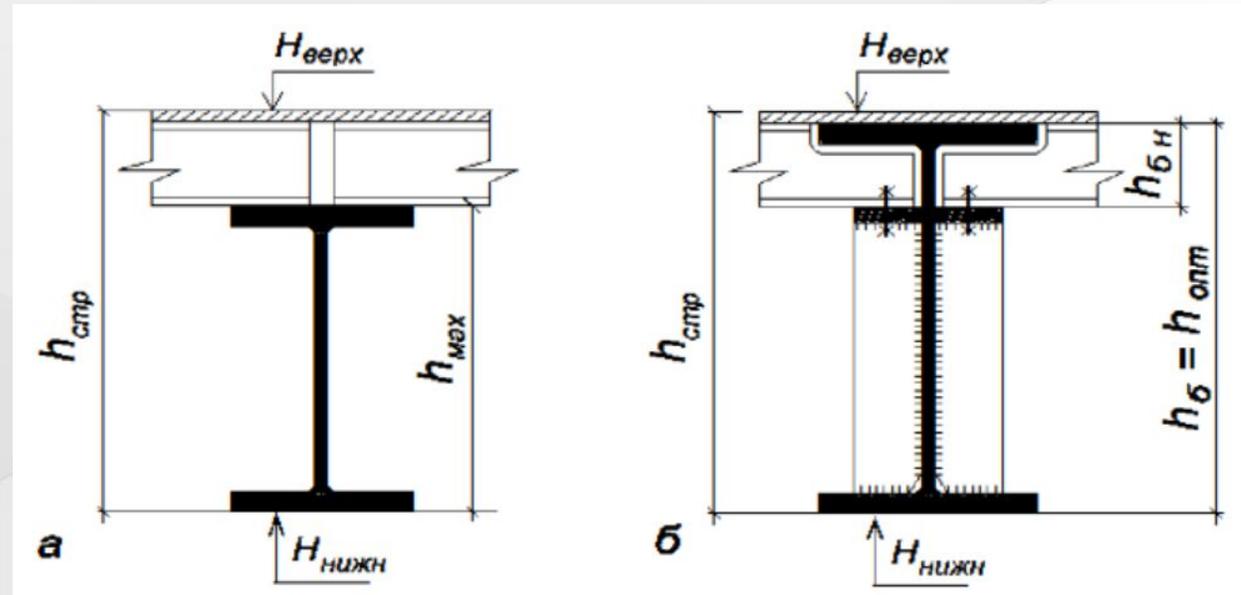
Определение минимальной высоты балки. Как известно, предельные состояния второй группы характеризуются достижением предельных прогибов, которые и определяют наименьшую высоту балки h_{min} . Наименьшую высоту балки, при которой ее прогиб равен предельному, допускаемому СП 20, называют минимальной высотой балки h_{min} . Высоту балки меньше минимальной принимать нельзя! Максимальный прогиб (в середине пролета) однопролетной шарнирно опертой по концам балки постоянной жесткости, загруженной равномерно распределенной нормативной постоянной q_n и временной p_n нагрузками, равен:

$$f_{\max} = \frac{5}{384} \frac{(p_n + q_n)l^4}{EI}$$

После некоторых преобразований значение минимальной высоты балки примет вид

$$h_{\min} = \frac{5}{24} \cdot \frac{R_y \cdot l}{E} \cdot \left[\frac{l}{f} \right] \cdot \frac{(q_n + p_n)}{(q + p)}$$

Определение предельной (максимальной) высоты балки. По конструктивным требованиям предельная высота балки определяется строительной высотой перекрытия $h_{\text{стр}}$, равной разности отметок верха перекрытия и верхнего габарита помещения под перекрытием.



Указанные отметки устанавливаются проектом здания или сооружения в целом. В пределах строительной высоты должны быть размещены все несущие конструкции перекрытия основные балки, вспомогательные балки, балки настила, настил.

При конструировании сопряжения балок желательно использовать этажное опирание вышележащих балок на нижележащие, как самое экономичное по металлоемкости и трудоемкости монтажа. Если оптимальная высота балки оказывается значительной и этажное сопряжение невозможно, то применяют конструктивное решение, с опиранием в одном уровне. Однако такое решение более металлоемко. На завершающем этапе выбора высоты сечения производят сопоставительный анализ минимальной, оптимальной и максимальной высот балки:

- при $h_{min} < h_{opt} < h_{max}$ высоту балки принимают близкой к h_{opt} ;
- при $h_{min} > h_{opt}$ и $h_{min} < h_{max}$ высоту балки принимают больше или равной h_{min} или заменяют сталь на менее прочную. Эта замена обеспечит сближение оптимальной и минимальной высот балки при снижении стоимости стали.

Когда $h_{opt} > h_{max}$, она не вписывается в габариты, и приходится мириться с некоторым повышением металлоемкости, принимая за основу h_{max} .

Если $h_{min} > h_{max}$, то минимально допустимая высота балки превышает габарит. В этом случае прежде всего следует попытаться согласовать изменение отметок верха или низа габарита. В противном случае придется проектировать конструктивно иную, например, коробчатую балку, опираясь на условие жесткости.

Наконец, высота балки связана с условиями перевозки. Предельная высота, определяемая габаритом железнодорожных перевозок, составляет 3,75 м.

При определении высоты балки определяющей является высота стенки, которая должна быть увязана со стандартными шириной выпускаемых листов прокатной или универсальной стали. При применении топостопистового проката необходима обработка кромок листа. Поэтому в этом случае высоту стенки

Определение толщины стенки.

Минимальную толщину стенки устанавливают исходя из условий прочности на срез, предельной гибкости стенки и стандартизации толщин листового проката.

Из условия прочности на срез. Возникающие в балке касательные напряжения в основном воспринимаются стенкой. В качестве условия прочности на срез в общем случае используют формулу

$$\tau_{\max} = \frac{Q_{\max} S_{\text{полу сечения}}}{t_w I} \leq R_s \gamma_c$$

откуда толщина стенки должна быть не менее:

$$t_{w,\min} \geq k \frac{Q_{\max}}{h R_s \gamma_c}$$

где $k = S \cdot h / I$.

При работе на срез всего двутаврового сечения — $k = 1,2$.

При учете работы на срез в опорном сечении только стенки — $k = 1,5$.

Из условия местной устойчивости стенки. При изгибе (рис. 9.15) в верхней части стенки возникают нормальные сжимающие напряжения и, если стенка тонкая, то она может потерять устойчивость.

Для того чтобы предотвратить потерю местной устойчивости стенки от действия нормальных напряжений, необходимо чтобы условная гибкость стенки не превышала предельных значений:

$$t_w \geq \frac{h_w}{5,5} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$$

откуда толщина стенки должна быть не менее

$$t_w \geq \frac{h_w}{5,5} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}}$$

Из инженерного опыта. Многолетний опыт изготовления, транспортировки и монтажа сварных балок показал, что стенка балки должна иметь достаточную толщину для того, чтобы сохранить свою форму при транспортировке и монтаже. Исходя из выше сказанного, толщину стенки принимают приблизительно равной

$$t_{ст} \approx 3h_0/1000 + 7 \text{ (мм)}$$

При назначении толщины стенки можно ориентироваться также на данные табл. 3. Назначенную толщину стенки следует увязать с размерами листового металлопроката.

Подбор сечения поясов.

Минимально необходимая площадь сечения одного пояса балки, исходя из требования прочности, может быть определена по приближенной формуле

$$A_f = b_f \cdot t_f = \frac{W}{h} - \frac{t_w h}{6}$$

откуда толщина стенки должна быть не менее

$$A_f = b_f \cdot t_f = \frac{W}{h} - \frac{t_w h}{6}$$

Задав одну из неизвестных величин, например толщину (табл. 4), можно определить требуемую ширину пояса

$$b_f = A_f / t_f$$

Полки балки обычно принимают из универсального проката. При назначении размеров пояса следует учитывать конструктивные требования, условия обеспечения общей устойчивости балки и местную устойчивость сжатого пояса. Требования общей и местной устойчивости противоречивы. С точки зрения общей устойчивости нужно развивать ширину полки, а с точки зрения местной - ее толщину.

Ширину пояса принимают не менее 200 мм (180 мм в КП), что связано с технологическими требованиями при выполнении автоматической сварки поясных швов и условиями опирания вышележащих балок на нижележащую.

Толщину полки желательно назначать в пределах $t_w < t_f < 3t_w$, но не более 40 мм для балок пролетом до 20 м, поскольку в противном случае проявит себя низкое качество толстого металлопроката. Можно приближенно принять толщину полки по требуемой величине момента сопротивления по табл. 9.4.

Рекомендуемые толщины полок составных балок в зависимости от требуемого момента сопротивления

Момент сопротивления $W_{тр}$, см ³	Менее 15 000	15 000– 20 000	20 000– 25 000	25 000– 28 800	Свыше 30 000
Толщина полки t_p , мм	16–18	18–20	22–25	28–30	30 и более