

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

Абдуллаев М.А., Дуняшин Н.С., Эрматов З.Д.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине «Проектирование сварных конструкций»

ТАШКЕНТ - 2008

УДК 621.791.1

Конспект лекций по дисциплине «Проектирование сварных конструкций»/ Абдуллаев М., Дуняшин Н.С., Эрматов З.Д. Ташкент: ТашГТУ, 2008. 160с.

Курс «Проектирование сварных конструкций» по учебному плану читается в 7 семестре бакалавриата.

В этом конспекте изложены основные вопросы теории проектирования и расчета основных типов сварных конструкций в объеме, необходимом для изучения студентами высшего специального заведения по направлению бакалавриата 5522700 «Машины и технология сварочного производства»

Печатается по решению научно-методического совета Ташкентского государственного технического университета

Рецензенты: зав. каф. «Машины и технология сварочного производства», проф., д.т.н. Абралов М.А. (ТашГТУ);

зам. главного сварщика Смирнова В.А. (ГАО ТАПОиЧ)

© Ташкентский государственный технический университет, 2008

Введение

Наука о создании сварных конструкций охватывает принципиальные вопросы рационального проектирования генеральных систем и схем машин, аппаратов, строительных конструкций, которые в основном разрабатываются специалистами отраслей.

Крайне большое значение имеет при проектировании конструкций использование накопленного опыта, применение типизированных конструкций, обеспечивающих прогрессивную технику.

Создание сварных конструкций требует рационального выбора металла, обеспечивающего металлоемкость проектируемых объектов и технологичность сварочных процессов.

На очередь дня встают вопросы использования материалов с самыми разнообразными свойствами: сталей (высокопрочных, коррозионно-устойчивых, теплоустойчивых, хладнопрочных и т. д.); цветных сплавов; керамики; полимеров.

При проектировании сварных соединений необходимо учитывать технологическую прочность соединяемых материалов — сопротивляемость образованию трещин при сварке, эксплуатационную прочность, в особенности чувствительность к концентраторам напряжений при переменных нагрузениях, вязкость, сопротивление удару.

Острой задачей является использование покрытий с целью сохранения конструкций от отрицательного влияния внешней среды и ослабления отрицательного влияния локальных поверхностей концентраторов.

При проектировании сварных конструкций необходимо правильно назначать технологические процессы сварки, выходить за пределы традиционных дуговой и контактной сварки, использовать методы соединения электронным лучом, лазером, диффузией, ультразвуком и т. д., широко применять голографические методы исследования, а также натурные испытания элементов проектируемых конструкций.

Лекция № 1

Материалы сварных конструкций

План:

- 1.1. Стали
- 1.2. Цветные металлы и сплавы
- 1.3. Сортамент

Для сооружения металлических сварных конструкций применяют стали, алюминий, титан и их сплавы, которые имеют различные механические свойства.

1.1. Стали

В зависимости от химического состава сталь бывает углеродистая и легированная.

Углеродистая сталь делится на низкоуглеродистую (содержание углерода до 0,25%), среднеуглеродистую (содержание углерода от 0,25 до 0,45%) и высокоуглеродистую (содержание углерода от 0,45 до 2,14%). Сталь, в составе которой, кроме углерода, имеются легирующие компоненты (хром, никель, вольфрам, ванадий и т. д.), называется легированной.

Легированные стали бывают: низколегированные (суммарное содержание легирующих компонентов, кроме углерода, менее 2,5%); среднелегированные (суммарное содержание легирующих компонентов, кроме углерода, от 2,5 до 10%); высоколегированные (суммарное содержание легирующих компонентов, кроме углерода, более 10%).

По способу производства сталь может быть:

а) обыкновенного качества (содержание углерода до 0,45%) кипящая, полуспокойная и спокойная. Кипящую сталь получают при неполном раскислении металла кремнием, она содержит до 0,05% кремния. Спокойная сталь имеет однородное плотное строение и содержит не менее 0,12% кремния. Полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталями и содержит 0,05—0,12% кремния;

б) качественной — углеродистой или легированной, в которых содержание серы и фосфора не должно превышать по 0,04% каждого;

в) высококачественной — углеродистой или легированной, в которых содержание серы и фосфора не должно превышать соответственно 0,030 и 0,035%. Такая сталь также имеет

повышенную чистоту по неметаллическим включениям и обозначается буквой А, помещаемой после обозначения марки.

По назначению стали бывают конструкционные (машиностроительные), инструментальные, строительные и стали с особыми физическими свойствами

Углеродистые конструкционные стали.

Сталь углеродистая обыкновенного качества. Для углеродистой стали обыкновенного качества по ГОСТ 380-94 установлены следующие марки: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6.

Качественные углеродистые конструкционные стали применяют для изготовления ответственных сварных конструкций. Они выпускаются по ГОСТ 1050—74, который гарантирует механические свойства и химический состав. Качественные углеродистые стали маркируются цифрами, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, Сталь 05 означают, что сталь содержит углерода 0,05%.

Легированные конструкционные стали.

Низколегированные стали (09Г2, 14Г2, 12ГС, 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1, 15ГФ, 15ХСНД и др.) легированы таким образом, чтобы повышение прочности и предела текучести стали сопровождалось сохранением достаточной пластичности, ударной вязкости, свариваемости.

Из теплоустойчивых сталей изготавливаются изделия, работающие при температурах, не превышающих 600 °С (для более высоких температур изделия производят из жаростойкой и жаропрочной сталей). К теплоустойчивым сталям относятся 12МХ; 20МХЛ; 34ХМ; 20ХЗМВФ; 20ХМФ; 20ХМФЛ; 12Х1М1Ф; 15ХМФКР; 12Х2МФБ; Х5М; 15Х5МФА и другие.

Большое значение в производстве имеют высоколегированные стали, обладающие специальными свойствами: повышенной сопротивляемостью коррозии при работе в агрессивных средах, жаропрочностью в условиях высоких температур и т.д.

К коррозионноустойчивым сталям относятся 0Х18Н10, 0Х18Н10Т, Х18Н10Т, Х18Н9, Х18Н9Т, 0Х18Н12Т, 0Х18Н12Б, 1Х21Н5Т, 1Х16Н13Б, Х18Н12Т и другие.

К жаростойким сталям относятся Х25Т, Х28, Х23Н18, Х23Н13, Х20Н14С2, Х25Н20С2 и другие.

К жаропрочным сталям относятся 1X16H14B2БР, 1X16H16B2МБР, 1X14H14B2М, 4X14H14B2М, 1X16H13М2Б, 1X14H14B2М, X18H12Т, X23H13, X23H18, ХН35ВТ и другие.

1.2. Цветные металлы и сплавы

Алюминий и его сплавы. Алюминий является одним из наиболее распространенных элементов в природе; он обладает малой плотностью, высокой электро- и теплопроводностью, высокой коррозионной стойкостью в окислительных средах и стойкостью против перехода в хрупкое состояние при низких температурах. Плотность алюминия $2,7 \text{ г/см}^3$. Теплопроводность алюминия в три раза выше теплопроводности малоуглеродистой стали. Температура плавления чистого алюминия 657°С . При нагревании алюминий легко окисляется, образуя тугоплавкую окись алюминия (Al_2O_3), плавящуюся при температуре свыше 2060°С .

Тугоплавкая пленка окиси и возможность образования пор и кристаллизационных трещин в металле шва — основные трудности при сварке алюминия.

Причиной образования пор в сварных швах является водород, который в связи с резким изменением растворимости при переходе алюминия из жидкого состояния в твердое, стремится выйти в атмосферу. Кристаллизационные трещины в сварных швах чистого алюминия возникают из-за повышенного содержания кремния и уменьшаются с введением в алюминий добавок железа.

В технике применяют не только чистый алюминий, но и сплавы его с марганцем, магнием, медью и кремнием. Сплавы алюминия обладают большей прочностью, чем чистый алюминий. Литейные алюминиевые сплавы (марок АЛ), содержащие 4—5% меди (АЛ7) или от 10 до 13% кремния (АЛ2), или 9,5—11,5% магния (АЛ8), способны хорошо отливаться. Литейные сплавы алюминия с кремнием называют силуминами.

В сварных конструкциях наибольшее применение находят деформируемые сплавы: термически неупрочняемые алюминиево-марганцевые (АМц), содержащие от 1 до 1,6% марганца, и алюминиево-магниевые (АМг), содержащие до 6,8% магния.

В самолетостроении используются термически упрочняемые сплавы дюралюмины (сплавы Д). Дюралюмин марки Д1 содержит:

3,8—4,8% меди, 0,4—0,8% магния, 0,4—0,8% марганца, остальное алюминий. Высокотемпературный дюралюмин Д16 содержит: 3,8—4,9% меди, 1,2—1,8% магния, 0,3—0,9% марганца, остальное — алюминий.

После термической обработки сплав Д16 имеет временное сопротивление при растяжении 420—460 МПа и относительное удлинение 15—17%.

Чистый алюминий, сплавы АМц, АМг и силумины хорошо поддаются сварке. Хуже свариваются термоупрочняемые сплавы Д. Это обусловлено тем, что в сварном шве такого сплава получается структура литого металла, прочность которого в два раза меньше прочности основного прокатанного металла. Кроме того, вследствие значительной усадки металла шва и его низкой пластичности, в процессе сварки возникают трещины в швах. При сварке происходит отжиг основного металла, что приводит к ухудшению механических свойств сварного соединения.

Магниево-алюминиевые сплавы. Магний — очень легкий металл, плотность его $1,74 \text{ г/см}^3$, температура плавления 651°C , временное сопротивление при растяжении литого магния 100—130 МПа, относительное удлинение 3—6%.

Магний интенсивно окисляется кислородом, а будучи в порошке или в виде ленты, легко воспламеняется на воздухе. Применяют его в виде магниевых сплавов плотностью около 2 г/см^3 и временным сопротивлением при растяжении около 270 МПа.

Литейные магниевые сплавы МЛ1, МЛ3, ... МЛ 6 содержат до 9% алюминия, до 3% цинка, до 2% марганца, остальное — магний. Деформируемые магниевые сплавы МА1, МА2, ... МА5 близки по химическому составу к литейным магниевым сплавам. Изделия из деформируемых магниевых сплавов штампуют в нагретом состоянии с последующей термической обработкой. Для предохранения от коррозии детали из магниевых сплавов покрывают защитной окисной пленкой, получаемой обработкой их растворами хромпика и азотной кислоты.

Титан и его сплавы. Титан обладает малым удельным весом ($4,5 \text{ г/см}^3$) и высокой антикоррозийностью. Температура плавления титана 1680°C . Технический титан и его сплавы содержат 0,08—0,6% углерода, 0,3—2,15% железа, 1—4% марганца, 0,74—4% хрома. Временное сопротивление титана при растяжении составляет 840—1260 МПа, относительное удлинение

от 5 до 20%. Одним из наиболее важных свойств титана является его высокая коррозионная стойкость во многих агрессивных средах. Титан обладает высокой прочностью при нормальной и повышенной температурах.

Титан имеет низкотемпературную α -фазу и высокотемпературную β -фазу.

Титан имеет высокое химическое сродство к кислороду, азоту и водороду: интенсивное насыщение его водородом начинается уже при температуре 250°C, кислородом—при 400° С и азотом—при 600° С. С повышением температуры активность титана резко возрастает. Скорость взаимодействия титана с кислородом в 50 раз выше, чем с азотом. Кислород легко растворяется как в α -фазе, так и в β -фазе титана и является сильным стабилизатором α -фазы. Азот также легко растворяется как в α -фазе, так и в β -фазе и является сильным стабилизатором α -фазы. Титан является единственным элементом, способным гореть в азоте. Водород стабилизирует β -фазу титана и образует с титаном твердые растворы и гидрид TiH₂.

При охлаждении титана уже 100—150° С происходит выпадение гидрида (γ -фазы), что является причиной образования холодных трещин при сварке. При медленном охлаждении γ -фаза выделяется в виде тонких пластинок, а при закалке—в виде высокодисперсных частиц.

Азот и кислород резко повышают прочность титана и снижают его пластичность. Водород в титане влияет главным образом на его склонность к разрушению

Основными трудностями при сварке титана являются:

а) высокая его активность по отношению к кислороду, азоту и водороду как в расплавленном, так и в твердом состоянии;

б) высокая склонность к росту зерна β -фазы и перегреву;

в) образование хрупкой α' -фазы при охлаждении.

Для получения качественного сварного соединения титана в нем ограничивают содержание азота, кислорода, водорода и углерода. С этой целью защищают металл шва и околошовной зоны при сварке инертными газами.

1.3. Сортамент

В сварных конструкциях применяют металл в виде проката, отливок, поковок и штампованных изделий. Наиболее часто сварные конструкции изготовляют из проката.

1) **Листовой прокат.** Листовую сталь получают прокаткой между валками без бокового давления. Сортамент на толстую листовую сталь включает листы толщиной 4...160 мм.

2) **Простой сортовой прокат.** К нему относят круглую, шестигранную и полосовую сталь. Круглая сталь (ГОСТ 2590—71) широко используется в качестве арматуры железобетонных сооружений, а также в строительных конструкциях, работающих под небольшими нагрузками.

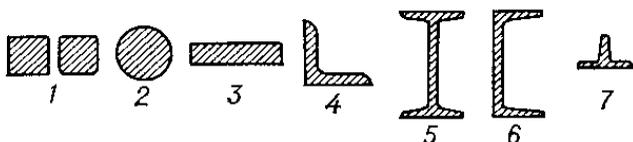


Рис. 1.1. Профили листового, сортового и фасонного проката:

1 – квадратный; 2 – круглый; 3 – прямоугольный (полосовой); 4 – угловой; 5 – двутавровый; 6 – швеллерный; 7 – тавровый

3) Фасонные профили общего назначения.

Двутавровые балки (двутавры) — профильные элементы с большими моментами инерции при относительно небольших площадях поперечного сечения (ГОСТ 8239—72). Номер двутавра указывает его высоту в сантиметрах.

Угловая сталь (уголки) состоит из двух полок равной или неравной ширины (ГОСТ 8509—86).

Швеллеры (ГОСТ 8240—72) используют при конструировании станин, рам, элементов ферм и других видов конструкций.

4) **Фасонные профили отраслевого назначения** применяют в различных областях народного хозяйства: для изготовления рельсов, железнодорожного транспорта, тавровых элементов строительных конструкций и т. д. Сортамент фасонных прокатных профилей включает периодические, штампованные, гнутые, прессованные и трубчатые профили.

а) **Периодические профили** (профили переменного сечения) целесообразно применять для изготовления арматуры железобетона. Винтообразная форма стержня увеличивает его поверхность и улучшает сцепление металла с бетоном. Применение периодического проката в машиностроении выгоднее чем обычного, так как позволяет уменьшить массу конструкций.

б) **Штампованные профили** толщиной 5...6 мм получают из листовой стали холодной штамповкой. Штампованные элементы находят широкое применение в авиастроении, автомобилестроении, промышленном строительстве.

в) **Гнутые профили** изготавливаются из горячекатаной и холоднокатаной отожженной листовой ленточной и полосовой стали обыкновенного качества и из низколегированной стали преимущественно малых толщин (3. . .4 мм). Гнутые профили экономичны

г) **Прессованные профили** изготавливают из алюминиевых сплавов. Им можно придавать разнообразные виды (открытые, трубчатые).

Трубчатые профили различных очертаний постоянного или переменного поперечного сечения изготавливают сваркой, горячей прокаткой, прессованием, горячим и холодным волочением и раздувкой. Помимо круглого профиля, наиболее распространенного в промышленности, изготавливают также фасонные трубы.

Трубы выпускают с широким диапазоном диаметров и толщин стенок. Их используют при монтаже трубопроводов, а также при изготовлении решетчатых конструкций

Контрольные вопросы:

1. Какие материалы применяются для производства сварных конструкций?

2. Перечислите виды проката, применяемого для производства сварных конструкций.

Лекция № 2

Сведения из строительной механики

План:

- 2.1. Понятие о фермах
- 2.2. Классификация ферм
- 2.3. Определение усилия стержней фермы аналитическим методом
- 2.4. Перемещения ферм
- 2.5. Определение расчетных усилий в балках методом линии влияния

2.1. Понятие о фермах

Шарнирной фермой называется геометрически неизменяемая система стержней, связанных между собой по концам шарнирами. Система неизменяема, если под действием внешних сил, приложенных к ней, перемещения ее точек происходят лишь вследствие упругих деформаций.

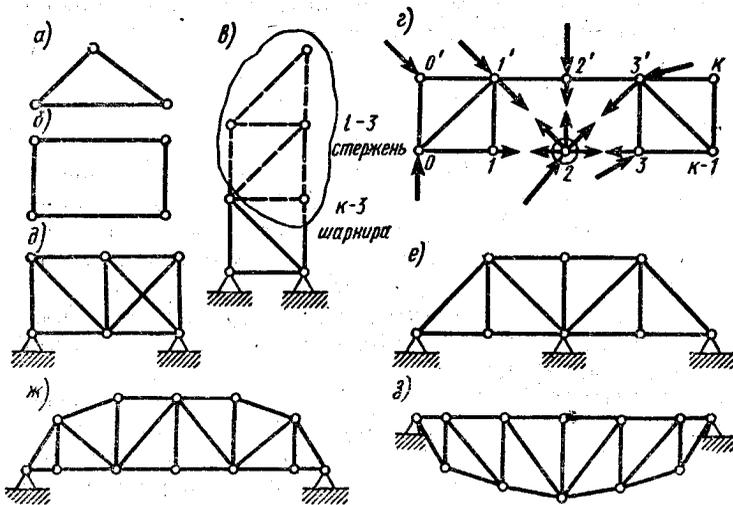


Рис. 2.1. Примеры шарнирных стержневых систем:

а — ферма из трех стержней; б — механизм; в — построение ферм добавлением к основному треугольнику пар стержней с шарниром; г — к определению усилий в стержнях; д, е — примеры статически неопределимых ферм; ж — ферма с полигональным верхним поясом и треугольной решеткой; з — ферма с полигональным нижним поясом и раскосной решеткой

Три стержня, соединенные между собой шарнирно, как показано на рис. 2.1, а, представляют собой неизменяемую плоскую ферму.

Четыре стержня, соединенные, как показано на рис. 2.1, б, представляют собой механизм.

Фермы со сварными соединениями не представляют собой шарнирных систем. Однако экспериментальные исследования показывают, что распределения усилий в фермах со сварными соединениями мало отличаются от распределения усилий в фермах, составленных из стержней, соединенных болтами — шарнирами. Поэтому сварные фермы условно рассматриваются как шарнирные системы.

Точки соединений стержней называются узлами фермы. Стержни обозначаются узлами, между которыми они заключены.

Из основного треугольника можно получить новые неизменяемые системы ферм последовательным добавлением двух стержней с шарниром. Образование ферм таким образом показано на рис. 2.1, в.

Фермы со структурой, полученной последовательным добавлением к основному треугольнику по два стержня с шарниром, называются простейшими.

Допустим, что простейшая ферма имеет закрепления, свойственные статически определимым системам, например, одну неподвижную, а другую подвижную опоры. Определим в этой ферме соотношение между количеством стержней и шарниров (рис. 2.1, в).

Обозначим число стержней фермы через i (кроме стержней, входящих в состав опорных закреплений), а число шарниров — через k .

На образование основной треугольной фермы требуются три стержня и три шарнира. Таким образом, количество стержней, не входящих в состав основного треугольника, составляет $(i-3)$, а количество шарниров, не входящих в состав этого треугольника, — $(k-3)$.

Так как образование ферм производится из основного треугольника последовательным добавлением двух стержней и одного шарнира, то

$$i-3 = 2(k-3), \quad (2.1)$$

откуда

$$i = 2k - 3. \quad (2.2)$$

Это является необходимым условием геометрически неизменяемой системы. Для простейших ферм оно является не только необходимым, но и достаточным.

Найдем условия статической определимости ферм. Будем полагать, что фермы загружены лишь в узлах. При этом в элементах, имеющих шарнирные крепления по концам, отсутствуют изгибающие моменты и поперечные силы. Единственным расчетным усилием в каждом стержне является продольная сила. Поэтому система имеющая i стержней, обладает таким же числом неизвестных усилий.

Для каждого узла фермы могут быть написаны два условия равновесия для определения неизвестных усилий в стержнях $\sum X = 0, \sum Y = 0$.

Если число узлов фермы равно 1, то число уравнений равновесия равно $2k$ (рис. 2.1, в).

Из указанных 2 уравнений должны быть определены все неизвестные усилия в стержнях, а также неизвестные реакции, приложенные в опорах.

Предположим, что ферма имеет опорные стержни, реакции которых находятся из уравнений статики. При этом три уравнения должны быть использованы для нахождения неизвестных реактивных сил.

Фермы такого рода статически определимы, если количество их стержней равно $(2-3)$. Таким образом, необходимые условия геометрической неизменяемости совпадают с условием статической определимости ферм, имеющих три стержня в опорных креплениях (одна опора — шарнирно-неподвижная с двумя стержнями и другая — шарнирно-подвижная с одним стержнем).

Однако возможны случаи, когда в части системы находится «лишний» с позиции неизменяемости стержень. При этом система в целом, несмотря на соблюдение условия $(2k-3)$, оказывается системой изменяемой.

Если количество стержней фермы i превышает $(2k-3)$, то усилия во всех стержнях фермы не могут быть определены при помощи уравнений статики. В этом случае необходимо использовать уравнения упругих деформаций.

Системы ферм, изображенные на рис. 2.1, г, ж, з, статически определимы; на рис. 2.1, д — система статически

неопределима, так как число стержней превышает $(2k-3)$. Ферма, изображенная на рис. 2.1, е, также статически неопределима, так как она имеет одно лишнее закрепление в опоре.

2.2. Классификация ферм

Фермы имеют верхний и нижний пояса, которые соединяются между собой решеткой. Вертикальные элементы решетки называют стойками; наклонные — раскосами.

Узлы нижнего пояса нумеруют 0, 1, 2...; верхнего — 0, 1', 2'... Стержни и усилия, возникающие в них, обозначают цифрами, определяющими рассматриваемый элемент.

Стержни 0'1', 1'2', 2'3' и т. д. составляют элементы верхнего пояса фермы (рис. 2.1, е).

Стержни 01, 12, 23 — элементы нижнего пояса (панели).

Стержни 11', 22', 33' и т. д.— стойки.

Стержни 01', 1'2, 23' и т. д.— раскосы.

Пример ферм с параллельными поясами изображен на рис. 2.1, е; с полигональным верхним поясом — на рис. 2.1, ж; с полигональным нижним поясом — на рис. 2.1, з. Решетка ферм, изображенная на рис. 2.1, ж, называется треугольной, а на рис. 2.1, з — раскосной.

В зависимости от назначений фермы называются стропильными, поддерживающими кровлю зданий, мостовыми, крановыми, вагонными и т. п.

Инженерное сооружение очень редко состоит из одной фермы, чаще применяют парные фермы, например, в кранах, вагонах, железнодорожных мостах, а во многих случаях ставят ряд ферм. При перекрытии проемов зданий фермы соединяют между собой стержнями, которые составляют связи. Связи, расположенные в плоскостях поясов, называют продольными, в плоскостях решетки поперечными.

В своей совокупности плоские фермы со связями образуют пространственную геометрически неизменяемую систему, которая может быть статически определимой или при наличии избыточного количества стержней статически неопределимой.

2.3. Определение усилия стержней фермы аналитическим методом

Усилия стержней фермы определяются по правилу РОЗУ: разрез фермы; отбрасывание одной части; замена стержней силами; условия равновесия отрезанной части.

Разрезы производят методами вырезания узла и рассечения фермы. В месте разреза к стержням прикладывают неизвестные силы и направляют стрелки от сечений. Растягивающие усилия считают положительными. Допустим, что после решения уравнений статики искомое неизвестное усилие имеет отрицательный знак. Это указывает на то, что знак усилия первоначально был выбран неправильно. Стержень оказывается не растянутым, а сжатым.

Определение усилий в стержнях ферм методом вырезания узлов удобно в следующих случаях:

1) в узле сходятся два стержня (рис. 2.2, а), при этом усилия находят из уравнений $\sum X = 0$, $\sum Y = 0$;

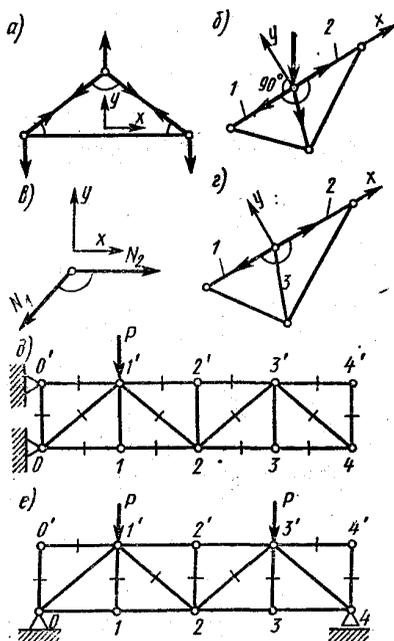


Рис. 2.2. К определению усилий в стержнях фермы методом вырезания узлов (перечеркнутые стержни не испытывают усилий)

2) в узле сходятся три стержня, два из них являются продолжением один другого (рис. 2.2, б), усилие в третьем стержне определяют проектированием всех сил на направление, перпендикулярное x ;

3) в узле сходятся несколько стержней, при этом все усилия, кроме двух, уже найдены какими-либо другими приемами.

Если в узле сходятся два стержня и отсутствуют внешние нагрузки, то усилия в обоих стержнях равны нулю. Спроецируем все силы на вертикаль $\sum Y = 0$, откуда $N_1 = 0$ (рис. 2.2 в) из условия $\sum X = 0$ следует, что $N_2 = 0$.

Если в узле сходятся три стержня при условии, что два являются продолжением один другого (рис. 2.2, а) и в узле отсутствует внешняя нагрузка, то усилие в третьем стержне равно 0. Проецируем силы на направление y , перпендикулярное стержням 1 и 2,

$$\sum Y = 0.$$

Убеждаемся в правильности того, что продольное усилие в третьем стержне $N_3 = 0$.

Легко показать, что в системе, изображенной на рис. 2.2, д, усилия во всех стержнях, кроме $O'1'$ и $01'$, равны нулю, в системе на рис. 2.2, е усилия в стержнях $00'$, $11'$, $22'$, $33'$, $44'$, $0'1'$, $3'4'$, $1'2'$, $23'$ равны нулю при заданных условиях нагружения.

При определении усилий в стержнях фермы методом ее рассечения (рис. 2.3, а) необходимо составить уравнения равновесия в виде

$$\sum M_1 = 0, \quad \sum M_2 = 0, \quad \sum M_g = 0,$$

где 1', 2 и g — моментные точки.

Точки называют моментными, если они определяются пересечением двух из перерезанных стержней фермы.

Моментная точка 1' лежит на пересечении стержней $1'2'$ и $1'2$; точка 2 — на пересечении $1'2$ и 12 ; точка g — на пересечении 12 и $1'2'$.

Если рассматриваемые разрезанные стержни параллельны, например, стержень 01 и $0'1'$ (рис. 2.3, б), то моментная точка

перемещается в бесконечность. При этом статические уравнения равновесия следует написать в форме

$$\sum M_0 = 0; \sum M_1 = 0; \sum Y = 0.$$

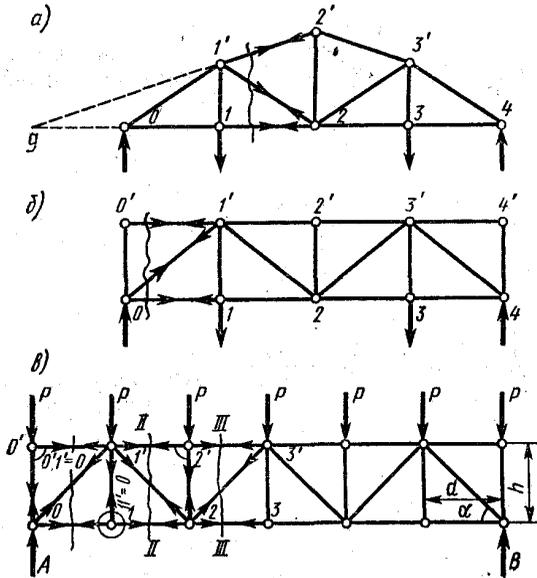


Рис. 2.3. К определению усилий в стержнях методом расщепления ферм:

а — ферма с непараллельными поясами; б, в — фермы с параллельными поясами

Каждое уравнение содержит одно неизвестное, так как остальные неизвестные усилия образуют относительно моментной точки моменты, равные нулю.

Распределение усилий в раскосах сквозных ферм с параллельными поясами подобно распределению поперечной силы в балочной сплошной конструкции. Усилия в раскосах имеют наименьшую величину в середине пролета. Усилия возрастают от середины пролета фермы к ее опорам.

2.4. Перемещения ферм

В результате продольных деформаций стержней узлы фермы испытывают перемещения в плоскости. Например, стержень I

под действием силы P удлинится на δl_1 , стержень 2 укорачивается на δl_2 (рис. 2.4). В результате изменения длин и поворотов стержней 1 и 2 точка O переместится в точку O' . Также перемещаются при удлинении стержней узлы фермы. Вертикальные составляющие перемещения узлов называют прогибами фермы. Часто в практике расчета определяют только прогибы узлов. Иногда вычисляют вертикальные f_B и горизонтальные f_H составляющие, а затем находят полные перемещения f по формуле

$$f = \sqrt{f_B^2 + f_H^2}. \quad (2.3)$$

Перемещения узлов фермы от вертикальных нагрузок определяют по формуле Мора:

$$f = \sum \frac{N \cdot N_1 l_i}{EA}, \quad (2.4)$$

где N — усилие в стержнях фермы от заданной нагрузки; N_1 — усилие в стержнях от единичной силы, приложенной в узле, в котором определяется перемещение по направлению искомого перемещения; l_i — длина i -го стержня; A — площадь его поперечного сечения; E — модуль упругости.

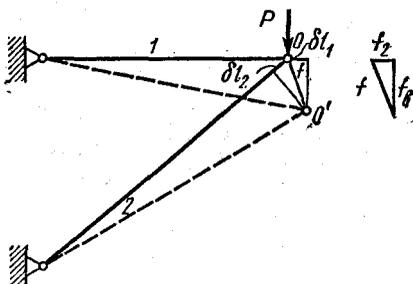


Рис. 2.4. Определение перемещений узлов O фермы под нагрузкой

2.5. Определение расчетных усилий в балках методом линии влияния

Расчетные усилия в балках часто удобно определять методом линий влияния. Этот метод особенно целесообразен при нахождении усилий в балках от движущихся систем грузов,

которые могут занимать различные положения на изучаемой конструкции, например, от веса тележек, перемещающихся по балкам крана.

Метод линий влияния принят при расчете не только балок, но и ферм, рамных конструкций и особенно при расчете мостов крановых и других инженерных сооружений.

Линия влияния выражает зависимость усилия (или деформации) в каком-либо заданном сечении балки или элементе фермы от положения груза в них. Линии влияния в практических расчетах всегда строят от одного груза, равного единице, в после этого построения ее используют для определения усилий (или деформаций) в изучаемом сечении или элементе при любом заданном нагружении от нескольких сосредоточенных сил или распределенных нагрузок.

Линии влияния опорной реакции в однопролетной балке с шарнирными опорами. Линия влияния опорной реакции балки выражает зависимость величины реакции от положения груза; равного единице, на балке.

Обозначим расстояние груза до левой опоры через x , пролет балки через l (рис. 2.5, а).

$$\text{Реакция } A = 1 \frac{l-x}{l}.$$

Реакция A определяется уравнением наклонной прямой (рис. 2.5, б):

$$\text{при } x=0 \quad A=1;$$

$$\text{при } x=l \quad A=0.$$

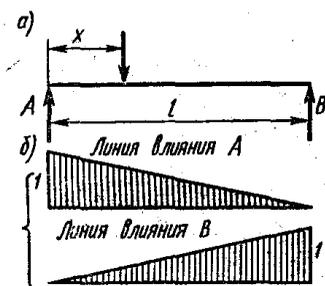


Рис. 2.5. К построению линий влияния опорных реакций и M в разных сечениях балки

Линии влияния поперечной силы. Линии влияния поперечной силы Q выражают зависимость величины поперечной

силы в заданном сечении a от положения груза, равного единице, на балке.

Допустим, что груз находится справа от сечения a :

$$Q_a = A = 1 \frac{l-x}{l}. \quad (2.6)$$

Построим эту линию из условия (рис. 2.6, а), что

при $x=0$ $Q_a=1$;

при $x=l$ $Q_a=0$.

Прямая верна на участке $l-a$.

Допустим, что груз находится слева от сечения a . При этом

$$Q_a = -B = -1 \frac{x}{l} \quad (2.7)$$

при $x=0$ $Q_a=0$;

при $x=l$ $Q_a=-1$.

Эта линия верна на участке $a-l$, под исследуемым сечением она меняет знак.

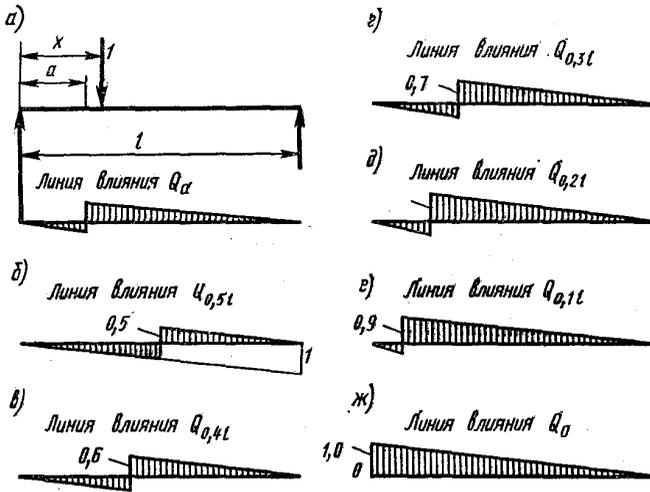


Рис. 2.6. К построению линии влияния Q в балке

Линии влияния Q для сечений балки $0,5 l$, $0,4 l$, $0,3 l$, $0,2 l$, $0,1 l$ показаны на рис. 2.6, а...ж. Ординаты линий влияния безразмерны.

Рассмотрим, как строятся линии влияния M и S для балки, защемленной в стену (рис. 2.7, а...г).

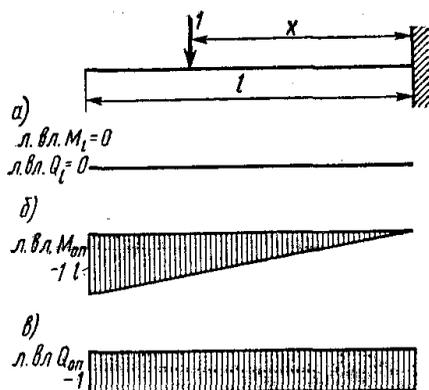


Рис. 2.7. К построению линий влияния защемленной в стену

В сечении на свободном конце M_l и Q_l всегда равны нулю, в каком бы месте ни находилась единичная сила на балке. Поэтому линии влияния для этого сечения являются нулевыми (рис. 2.7, а). В сечении по опоре $M_0 = -1 \cdot x$, т. е. линия влияния имеет вид наклонной прямой. При $x=0$, т. е. когда сила находится в опорном сечении, $M_0=0$ при $x=l$ (груз на конце консоли), $M=-1 \cdot l$ (рис. 2.7, б). Поперечная сила в опорном сечении $Q_0 = -1$ в каком бы сечении балки ни находился груз (рис. 2.7, в).

Использование линий влияния для определения усилия от системы сосредоточенных сил P и равномерно распределенной нагрузки Q . Построенной линией влияния пользуются для определения усилия в заданном сечении балки от различной комбинации сосредоточенных и сплошных нагрузок.

Предположим, что для сечения a балки построена линия влияния усилия R , имеющая вид, показанный на рис. 2.8, а.

Балка загружена сосредоточенными силами P_1, P_2, P_k и равномерной нагрузкой на участке $l—a$.

Ординаты линии влияния под силами P_1, P_2, P_k обозначим соответственно y_1, y_2, y_k .

Пользуясь принципом независимости действия сил, находим усилие в сечении a :

$$P_R = P_1 y_1 + P_2 y_2 + P_k y_k = \sum P_i y_i. \quad (2.8)$$

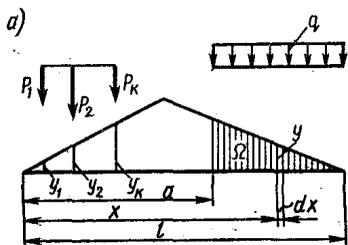


Рис. 2.8. Определение усилия от P и q на основе построенной линии влияния

Усилие от равномерной нагрузки найдем, заменив сосредоточенную нагрузку бесконечно большим количеством бесконечно малых сосредоточенных сил:

$$R_q = \int q dx y = q \Omega, \quad (2.9)$$

где Ω — площадь линии влияния на длине загруженного участка. Полное усилие

$$R = \sum P_i y_i + q \Omega \quad (2.10)$$

выражает собой продольную силу N , поперечную силу Q , момент M и т. д. в зависимости от построения линий влияния.

При расчете балок, нагруженных крановыми тележками, для определения наибольших изгибающих моментов и поперечных сил необходимо сначала построить линии влияния M и Q для поперечных сечений ($0,1l$, $0,2l$ и т. д.). Далее следует определить усилие от нагруженной тележки с учетом того, что она занимает на балке разные положения, при которых усилия в изучаемых значениях ($0,1l$, $0,2l$ и т. д.) являются наибольшими.

Линии влияния усилий стержневых ферм. При нагружении ферм движущимися нагрузками, например, тележкой крана, целесообразно определять усилия в стержнях методом линий влияния. Линии влияния усилий стержней фермы выражают зависимость величины усилий в стержнях от положения груза, равного единице, на ферме. Таким образом, для каждого стержня (элемента) фермы строится соответствующая линия влияния.

Груз может перемещаться как по верхнему, так и по нижнему поясу фермы в соответствии с загружениями реальными силами.

По продольным брускам перемещается груз, равный единице, воспринимаемый фермой через поперечные брусья. Таким образом осуществляется передача нагрузки на ферму по узлам.

В действительности такая надстройка нередко осуществляется в сооружениях. Если же она в действительности отсутствует, то для построения линий влияния продольных усилий поясов следует допустить, что она все же имеет место.

Докажем, что при перемещении груза от узла к узлу пояса линия влияния усилия в стержнях фермы определяется уравнением прямой линии.

Определим усилия в каком-либо стержне, например, 2'3', когда $P=1$ последовательно находится в узлах 2' и 3'.

Обозначим величину усилия рассматриваемого стержня 2'3' при положении груза в узле 2' через N_2 , а при положении в узле 3' — N_3 .

Если груз, равный 1, находится в панели на расстоянии от узла 2' (рис. 2.9), то ферма испытывает нагружения:

в узле 2':

$$P_{2'} = 1 \frac{d-z}{d} \quad (2.11)$$

в узле 3':

$$P_{3'} = 1 \frac{z}{d}. \quad (2.12)$$

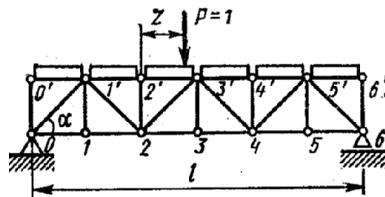


Рис. 2.9. Построение линий влияния усилий в стержнях ферм с параллельными поясами

Таким образом, при перемещении груза от узла 2' до узла 3' усилие в стержне 2'3' может быть найдено

$$N = N_2 \frac{d-z}{d} + N_3 \frac{z}{d},$$

где N_2 и N_3 — величины, не зависящие от z , d — длина панели.

Полученное уравнение представляет собой линейную функцию z .

Таким образом, усилие в элементе при перемещении груза от узла к узлу изменяется по закону прямой линии. Это используют при построении линий влияния элементов ферм.

2.6. Определение усилий стержней ферм при нахождении груза на поясе

Выше рассматривались случаи, когда перемещающийся груз, от которого строились линии влияния, не вызывал местного изгиба в поясе.

Допустим, что нагрузки приложены не в узлах ферм, а по длине панели. При этом нагрузки следует разложить по узлам обычным путем, от них определять продольные силы в стержнях фермы.

В нагруженных панелях помимо продольных сил действуют поперечные силы Q и изгибающие моменты M , которые определяют при рассмотрении нагруженного пояса фермы в качестве балки. Правильнее вычислить M и Q в панели, как и в неразрезанной балке, опорами которой служат узлы фермы.

В первом приближении вычисляют M и Q в нагруженной панели, как в однопролетной балке с шарнирными опорами, у которых пролет l равен длине панели d .

Более целесообразно рассмотрение панелей пояса как трехпролетной неразрезанной балки, опорами которой являются узлы фермы. Определение M и Q заканчивается нахождением расчетных усилий.

Контрольные вопросы:

1. Что называется шарнирной фермой?
2. В чем основная разница между шарнирной фермой и механизмом?
3. На каком основании сварные фермы рассматриваются как шарнирные системы?
4. Что называется простейшей фермой?
5. Как записывает соотношение, определяющее геометрическую неизменяемость шарнирной фермы?

6. Можно ли получить из простейших ферм другие системы, например, путем замены одного стержня другим?

7. Как изменится геометрическая неизменяемость при добавлении дополнительных стержней?

8. Какие системы фермы называются статически определимыми?

9. В чем состоит метод РОЗУ?

10. В каких случаях целесообразно определять усилия методом вырезания узлов?

11. Когда этот метод следует заменить методом расчленения фермы?

12. В чем состоит аналогия между распределением усилий в поясах фермы и балки со сплошной стенкой?

13. Что понимают под прогибом фермы?

14. Как определяют вертикальную составляющую перемещения узла фермы по способу Мора?

15. Как определяют горизонтальную составляющую перемещения узла фермы по способу Мора?

16. Как находят полное перемещение узла фермы?

17. Что называется линией влияния опорной реакции, изгибающего момента; поперечной силой?

18. Что называется линией влияния прогиба?

Лекция № 3 Сварные балки

План:

- 3.1. Эволюция конструктивных форм балок
- 3.2. Централизованное изготовление сварных балок
- 3.3. Расчет жесткости и прочности балок (подбор сечений)

3.1. Эволюция конструктивных форм балок

С исторической точки зрения балки непрерывно эволюционировали.

На первоначальном этапе осуществляли изготовление балок, прокаткой на примитивных станах с относительно небольшими поперечными сечениями. Большое значение имела прокатка двутавров.

Условие проката не позволяло придавать им наиболее рациональные формы, полки имели небольшую ширину, а стенка — значительную толщину.

Такой тип был не рационален с позиции использования металла. В балке, работающей на изгиб, наиболее напряженная зона — полка. Стенка нагружена в меньшей степени. Следует основную массу металла иметь в полках, а в стенках — меньшую долю. Сварка открыла возможность создания рациональных коробчатых профилей (рис. 3.1).

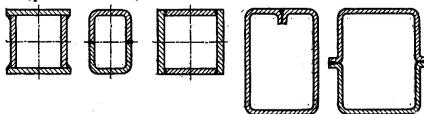


Рис. 3.1. Типы поперечных сечений сварных коробчатых балок

В настоящее время положение изменилось. Валки прокатываются с широкими полками с параллельными кромками (рис. 3.2,а), что облегчает взаимное сопряжение балок во взаимно перпендикулярных направлениях. Прокатываются тонкостенные двугавры.

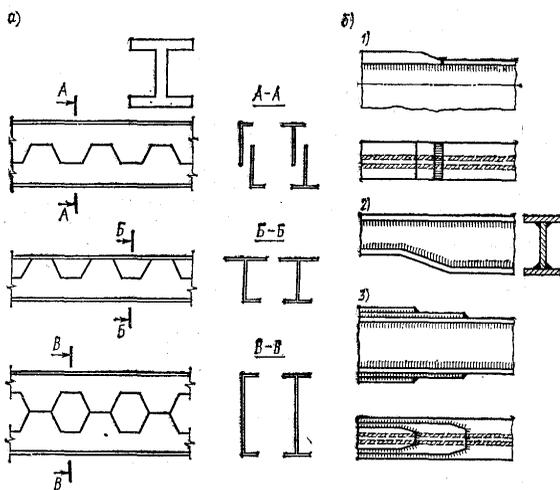


Рис. 3.2. Способы изготовления балок:

А - зигзагообразное разрезание проката балки; б — балки с изменяющимся поперечным сечением: 1 — по толщине листов; 2 — по высоте; 3 — по числу листов

Разработан метод зигзагообразного разрезания проката балки в продольном направлении с последующим смещением одной разрезанной половины относительно другой (рис. 3.2, а).

Далее осуществляется сварка выступа переменной высоты и формы.

Таким путем значительно увеличилась высота профиля, его момент инерции относительно горизонтальной оси, а следовательно, сопротивление изгибу. В некоторых случаях половины двутавров применяют из сталей разных свойств, после сварки образуются бистальные балки. Несмотря на повышение эффективности указанного мероприятия с позиции уменьшения массы, оно не получило широкого распространения в производстве из-за дополнительных технологических трудностей.

3.2. Централизованное изготовление сварных балок

Подлинная революция в производстве произошла после создания сварных балок.

Сварка позволяет создавать балки всевозможных размеров — высотой до 3...4 м. и более, а также любой длины.

Она позволяет наиболее рациональным образом сочетать размеры горизонтальных листов, часто называемых поясами, с вертикальной стенкой.

Применяются балки с толстыми широкими поясами в сочетании с высокими тонкими стенками.

Пояса нередко выполняются не только из листового проката, но и из других профилей, например, прокатных швеллеров, а также при необходимости из гнутых профилей. Пояса могут состоять из двух листов и более, при необходимости обладать разными свойствами.

Показателем экономичности сечения балки служит параметр

$$\frac{W}{A},$$

где W — момент сопротивления профиля, см³; A — площадь сечения профиля, см².

Чем выше это отношение, тем при меньшей массе металла достигается увеличение сопротивления профиля на изгиб.

Однако принимать чрезмерно тонкие вертикальные стенки оказывается невозможным из-за недостатка местной устойчивости. Необходимо разумное сочетание размеров. Сварочный процесс допускает в этом отношении разные вариации.

Производство двутавров прокаткой при приблизительно одинаковых размерах со сварными — производительнее. Но огромные преимущества сварной конструкции, допускающие ее оформление в желаемых соотношениях размеров, делают их более экономичными с позиций расхода металла, а во многих случаях и более рентабельными по стоимости.

Большое значение имеет характер производства. При крупносерийном производстве нередко оказывается рентабельнее прокатка, а при мелкосерийном и особенно в индивидуальном производстве — сварка.

Расширение строительства автоматизированных линий выдвигает сварные конструкции на первую линию перед другими способами их выполнения.

Выбор производства балки — прокаткой или сваркой — должен решаться при непременном использовании ЭВМ с учетом широкого комплекса факторов, определяющих рентабельность всего производственного цикла.

При расчете балок встречаются три вида задач:

1. Заданы размеры балки, известны расчетные усилия — изгибающие моменты и поперечные силы. Требуется проверить прочность балки. В этом случае определяют нормальные и касательные напряжения.

2. Задана балка и допускаемые напряжения. Требуется определить допускаемую нагрузку на балку. Эта задача также легко решается с использованием общеизвестных формул из курса «Сопроотивление материалов».

3. Требуется спроектировать балку, обеспечивающую требуемую грузоподъемность. Эта задача решается следующим образом: от заданной нагрузки определяют опорные реакции, строят эпюры поперечных сил, изгибающих моментов M по длине и крутящих моментов, если последние имеют место.

При наличии подвижных нагрузок строят линии влияния опорных реакций, затем линии влияния Q и M для сечений $x=0$, $x=0,1l$, $x=0,2l$, . . . $x=0,5l$, где l — длина балки. В указанных сечениях вычисляют максимальные значения усилий при самом опасном для них положении подвижных нагрузок. После этого подбирают размеры поперечных сечений балки, обеспечивающие прочность. Из условия прочности расчетные напряжения не должны превышать $1,05[\sigma]_p$. При экономном подходе к расходу

металла расчетное напряжение должно быть больше $0,95 [\sigma]_p$, где $[\sigma]_p$ — допускаемое растягивающее напряжение для основного металла.

Поперечные сечения балок, в особенности двутаврового профиля, иногда изменяются по длине (рис. 3.2, а). В некоторых случаях изменяют толщину или ширину горизонтальных листов (рис. 3.2, б). Это более целесообразно, нежели изменять толщину вертикальных листов. Иногда горизонтальные пояса делают составными по толщине, если толщина пояса 825. . 30 мм, при этом в менее нагруженных листах число листов уменьшают (рис. 3.2, б).

Балки переменного сечения позволяют лучше использовать несущую способность металла по всей их длине. Они дают экономию металла в сравнении с балками постоянного профиля, значительная часть которых работает при напряжениях, значительно меньших допускаемых.

В технологическом отношении балки переменного профиля несколько сложнее. Вопрос выбора конструкций решается с экономических позиций, а иногда и с учетом общей компоновки и эстетики. Большинство типовых балок имеет профиль, постоянный по длине.

3.3. Расчет жесткости и прочности балок (подбор сечений)

Балка должна удовлетворять требованию жесткости, т. е. ее прогиб f_{\max} от наибольшей нагрузки не должен превышать предельно допускаемый. Обычно в балках предельное значение отношения f_{\max}/l регламентируется нормами. Норма жесткости для балок разного назначения различна, например, в подкрановых балках $f_{\max}/l \leq 1/600 \dots 1/700$; в главных балках междуэтажных перекрытий $f_{\max}/l \leq 1/400$

Чтобы удовлетворить требованиям жесткости, балка должна иметь высоту не менее некоторой предельной. Эта минимальная высота определяется видом нагружения и допускаемыми напряжениями. Рассмотрим, какова должна быть наименьшая высота балки, свободно лежащей на двух опорах, если она нагружена равномерной нагрузкой (рис. 3.3, а).

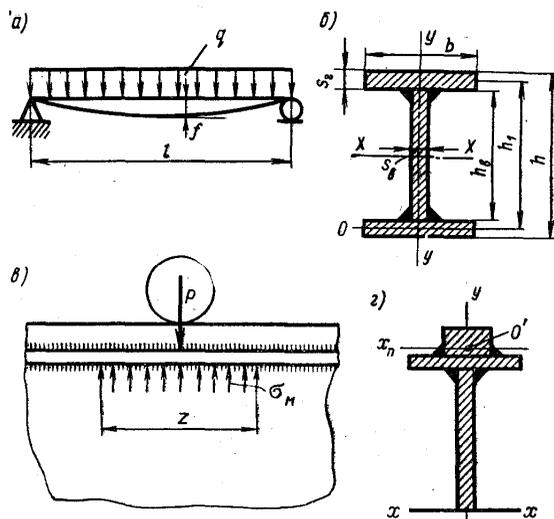


Рис. 3.3. К расчету сварной балки:
 а — изогнутая ось балки от q ; б — поперечное сечение балки; в, г — влияние сосредоточенной силы

Расчетный прогиб в середине пролета:

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EJ}, \quad (3.1)$$

где EJ — жесткость балки.

Для рассматриваемой балки расчетный момент

$$M = \frac{ql^3}{8}. \quad (3.2)$$

Подставляя значение M в формулу (3.1), получим

$$f = \frac{5Ml^2}{48EJ} \quad (3.3)$$

изгибающий момент

$$M = [\sigma]_p W, \quad (3.4)$$

где $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение; W — момент сопротивления.

Если расчетное сечение симметрично относительно горизонтальной оси, то $W = \frac{2J}{h}$, где h — высота балки

Подставим значение M из формулы (3.2) в формулу (3.3):

$$f = \frac{5[\sigma]_p l^2}{24Eh} \quad (3.5)$$

откуда

$$\frac{f}{l} = \frac{5[\sigma]_p l}{24Eh} \quad (3.6)$$

или

$$\frac{h}{l} = \frac{5[\sigma]_p l}{24Ef} \quad (3.7)$$

Высота балки, вычисленная по формуле (3.7), является наименьшей при заданных $[\sigma]_p$ и f/l и может быть увеличена, если это диктуется соображениями компоновки конструкции или экономии металла.

В общем случае

$$h = \varphi_0 [\sigma]_p l^2 / Ef \quad (3.8)$$

Балки из стали Ст3 для различных элементов конструкций могут принимать следующие предельные отношения f/l (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Характеристики жесткости конструкций

Тип конструкции	f/l
Подкрановые балки и фермы:	
- при ручных кранах	1/500
- при электрических кранах грузоподъемностью до 50т	1/600
- при электрических кранах грузоподъемностью свыше 50 т	1/750
Монорельсовые пути	1/400
Балки рабочих площадок производственных зданий:	
- главные при отсутствии рельсовых путей	1/400
- прочие	1/250
Балки междуэтажных перекрытий:	
- главные	1/400
- прочие	1/250

При действии моментов в вертикальной M_x и горизонтальной M_y плоскостях должно удовлетворяться требование

$$\sigma_x + \sigma_y < [\sigma]_p. \quad (3.9)$$

Балка должна удовлетворять прочности при условии наименьшей массы, т. е. поперечное сечение должно быть минимальным.

Высота балки для двутаврового профиля с этой целью может быть найдена по формуле

$$h = (1,3 - 1,4) \sqrt{\frac{M}{s_B [\sigma]_p}}, \quad (3.10)$$

а для коробчатого профиля

$$h = \sqrt{\frac{M}{s_B [\sigma]_p}}, \quad (3.11)$$

где s_B — толщина вертикального листа.

При проектировании балок толщина s_B , в формулах (3.10) и (3.11) неизвестна. Поэтому ее первоначально задают. Для разных строительных конструкций обычно можно принимать $s_B = 5 \dots 10$ мм

$$s_B = \frac{\sqrt{10h_B}}{12,5}, \quad (3.12)$$

для тяжелых конструкций

$$s_B = 7 + 0,005h_B, \quad (3.13)$$

где s_B и h_B выражены в миллиметрах.

Значения h , найденные с учетом требований достаточной жесткости и прочности, а также при условии наименьшей массы, могут оказаться совершенно различными. Из двух значений, вычисленных для балки двутаврового профиля по формулам (3.7) и (3.8) или (3.10) и (3.11), следует принять большее и во всяком случае не меньшее, чем при вычислении по формулам (3.7) и (3.8).

Далее подбирают размеры поперечного сечения балки с учетом расчетного и изгибающего момента M и высоты h .

Рассмотрим процесс подбора сечения двутаврового профиля (рис. 3.1, б). Для этого найдем требуемый момент сопротивления

$$W_{TP} = \frac{M}{[\sigma]_p}, \quad (3.14)$$

а требуемый момент инерции сечения

$$J_{TP} = W_{TP} \frac{h}{2}. \quad (3.15)$$

Вычислим момент инерции J_B вертикального листа высотой h_B и толщиной s_B . Принимаем $h_B = 0,95h$.

Находим требуемый момент инерции двух горизонтальных листов:

$$J_{\Gamma} = J_{TP} - J_B. \quad (3.16)$$

В другой форме момент инерции выразится так:

$$J_{\Gamma} = 2 \left[J_0 + A_{\Gamma} \left(\frac{h_1}{2} \right)^2 \right], \quad (3.17)$$

где J_0 — момент инерции горизонтального листа относительно собственной оси, который всегда очень мал и может быть принят равным нулю; h_1 — расстояние между центрами тяжести горизонтальных листов, которое можно принять равным $(0,96...0,98)h$.

Из уравнения (9.18) находим требуемую площадь сечения одного горизонтального листа:

$$A_{\Gamma} = \frac{2J_{\Gamma}}{h_1^2} \quad (3.18)$$

Подобрав размеры поперечного сечения балки, определим напряжения и таким образом проверим, удовлетворяют ли подобранные размеры условиям прочности.

Напряжение от изгиба

$$\sigma = \frac{Mh}{2J}. \quad (3.19)$$

Касательное напряжение от поперечной силы будет

$$\tau = \frac{QS}{Js_B}, \quad (3.20)$$

где Q — наибольшая поперечная сила балки; S — статический момент полуплощади сечения (симметричного) относительно центра тяжести балки (рис. 3.3, б).

Эквивалентные напряжения проверяются обычно в тех случаях, когда максимальные значения σ и τ совпадают по длине балки в одном сечении. Их определяют на уровне верхней кромки вертикального листа:

$$\sigma_{\text{э}} = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2}. \quad (3.21)$$

Из формулы (3.21) имеем нормальное напряжение

$$\sigma_1 = \frac{Mh_B}{2J}, \quad (3.22)$$

касательное напряжение

$$\tau_1 = \frac{QS_1}{J S_B}, \quad (3.23)$$

где S_1 статический момент площади горизонтального пояса относительно центра тяжести сечения балки.

В большинстве случаев эквивалентные напряжения σ_0 оказываются меньше σ , вычисленного по формуле (3.19).

Допустим, что к верхнему поясу балки прикладывают сосредоточенные перемещающиеся грузы (рис. 3.3, в). Это имеет место в крановых, подкрановых и мостовых балках. При этом определяют прочность вертикального листа с учетом местного напряжения под грузом:

$$\sigma_m = \frac{mP}{S_B z} \quad (3.24)$$

где m — коэффициент, который имеет различные значения, $m=1,4\dots 1,5$ — при тяжелом режиме работы балки (например, в металлургических цехах); $m=1$ — при легком режиме (в ремонтных цехах и т. п.); z — условная длина, на которой сосредоточенный груз распределяется в вертикальном листе (рис. 3.3, в):

$$z = 3,25 \sqrt{\frac{J_{\Pi}}{S_B}} \quad (3.25)$$

Здесь J_{Π} — момент инерции горизонтального листа совместно с приваренным к нему рельсом (если таковой имеется) относительно оси x_{Π} , проходящей через их общий центр тяжести (рис. 3.3, а).

Контрольные вопросы:

1. Что называется балкой?
2. Какие поперечные сечения балок целесообразно применять при их изгибе в одной плоскости, например, вертикальной, и в двух плоскостях?
3. На какие усилия производят расчет прочности балки?

Лекция № 4 Сварные балки

План:

- 4.1. Общая устойчивость
- 4.2. Местная устойчивость
- 4.3. Расчет балок с учетом пластических деформации
- 4.4. Работа балок на кручение
- 4.5. Сварные соединения

4.1. Общая устойчивость

Высокие балки, у которых $J_x < J_y$ под вертикальной нагрузкой могут терять общую устойчивость. Для предотвращения потери общей устойчивости следует:

1. Ограничивать свободную длину изгибаемого элемента. Например, две параллельные изгибаемые балки 1 и 2 следует взаимно соединять связями на расстоянии l_0 (рис. 4.1), особенно сжатые пояса. Такие связи ставят в подкрановых балках, мостовых кранах и т. п.

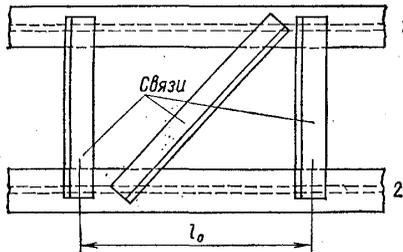


Рис. 4.1. Закрепление балки в горизонтальной плоскости

2. Проверять напряжения в изгибаемой балке с учетом требований обеспечения общей устойчивости:

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma]_p \varphi, \quad (4.1)$$

где φ — коэффициент уменьшения допускаемых напряжений в балке с учетом обеспечения ее устойчивости. В балках двутаврового профиля нередко принимают

$$\varphi = \psi \frac{J_y}{J_x} \left(\frac{h}{l_0} \right)^2 10^3, \quad (4.2)$$

где J_x и J_y — моменты инерции относительно осей x и y ;
 h — полная высота балки; l_0 — пролет балки или расстояния между закреплениями, препятствующими перемещениям в горизонтальной плоскости; ψ — коэффициент.

Полученный при вычислении по формуле (4.2) результат следует корректировать по табл. 4.1.

Таблица 4.1

Скорректированные значения коэффициента φ

Значения коэффициента, полученные по формуле (4.2)	Значения коэффициента, принимаемые в расчетах
0,85...1,0	0,85
1,0...1,25	0,90
1,25... 1,55	0,96
свыше 1,55	1,0

Коэффициент ψ рассматривают как функцию α (табл. 4.2), т. е.

$$\alpha = 8 \left[\frac{l_0 s_{\Gamma}}{bh} \right]^2 \left[1 + h s_{\sigma}^3 / 2 b s_{\Gamma}^3 \right]. \quad (4.3)$$

Значения приведены для двутавровых балок из стали Ст3. Для более прочных сталей значения следует умножить на отношение $210/R$, где R — расчетное сопротивление для данных сталей.

Таблица 4.2

Значения коэффициента ψ как функции α

α	0,1	1,0	8,0	16,0	32,0	64,0
ψ	1,73	1,85	2,63	3,37	4,59	6,50

При проектировании балок целесообразно поступить следующим образом: предварительно задаться отношением $l_0/b=10...20$; определить α по формуле (4.3), затем по табл. 4.2 найти значение ψ (b — ширина пояса балки).

4.2. Местная устойчивость

Помимо проверки общей устойчивости необходимо проверить отдельные элементы балки на местную устойчивость. В сжатых поясах потеря устойчивости происходит, когда напряжения сжатия превышают критические значения.

Местная устойчивость сжатых поясов балок обеспечивается условием

$$b \leq 30s_B \sqrt{\frac{210}{R}}, \quad (4.4)$$

где b — ширина пояса; s_B — толщина пояса; R - расчетное сопротивление.

Устойчивость вертикального листа в балках из низкоуглеродистой стали обеспечена, если при отсутствии сосредоточенных сил, перемещающихся по балке,

$$\frac{h_B}{s_B} \leq 110 \sqrt{\frac{210}{\sigma_T}}, \quad (4.5)$$

а при наличии сосредоточенных сил, перемещающихся по балке,

$$\frac{h_B}{s_B} \leq 80 \sqrt{\frac{210}{\sigma_T}} \quad (4.6)$$

(σ_T выражено в МПа).

В вертикальных листах балок потеря устойчивости может быть вызвана нормальными сжимающими напряжениями и комбинацией нормальных и касательных напряжений. Касательные напряжения τ вызывают в диагональных сечениях нормальные сжимающие σ_{\max} и растягивающие σ_{\min} напряжения.

Критические касательные напряжения (рис. 4.2, а), вызывающие потерю устойчивости вертикального листа, определяются по формуле

$$\tau_{кр} = v_0 \left[\frac{E}{1 - \mu^2} \right] \left(\frac{s_B}{h_B} \right)^2, \quad (4.7)$$

где μ — коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3$); h_B — высота вертикального листа, v_0 — коэффициент, зависящий от

отношения длины вертикального листа a между его закреплениями к его высоте h .

Если балка имеет значительную длину, а вертикальный лист не имеет закреплений, то ν_0 можно принять равным 4,4.

Критические нормальные напряжения $\sigma_{кр}$, в вертикальном листе балок вычисляются по формуле, аналогичной формуле (4.7), но при других значениях коэффициента ν_0 они выше, чем для $\tau_{кр}$.

В балках значительной длины $\nu_0 = 19$. Таким образом, $\sigma_{кр}$ менее опасны в отношении устойчивости, чем $\tau_{кр}$. На практике при определении устойчивости вертикальных листов балок приходится учитывать комбинированное действие нескольких видов напряжений.

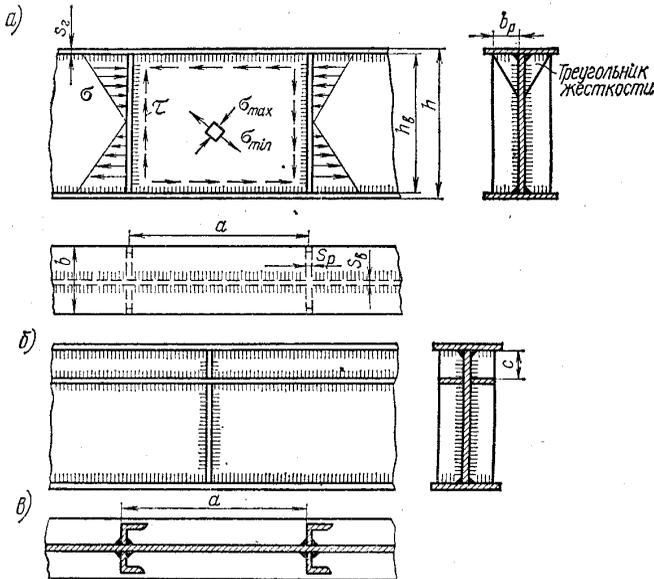


Рис. 4.2. К расчету местной устойчивости вертикальных листов балок:

а — образование напряжений σ и τ , вызывающих потерю устойчивости; б, в — постановка ребер жесткости

Для повышения местной устойчивости вертикального листа, т. е. для увеличения $\tau_{кр}$, при заданной высоте балки следует

уменьшить a , устанавливая ребра жесткости. Постановка ребер жесткости необходима, если не соблюдены условия (4.5) и (4.6). Обычно вертикальные ребра жесткости конструируют из полос, реже — из профильного материала (рис. 4.2, в).

Ширину ребра (мм) принимают $b_p = h_B / 30 + 40$ мм; толщину $s_p \geq b_p / 15$. Расстояние между ребрами жесткости определяется значением напряжений и размерами балки, но не менее $1,2h_B$

Помимо основных ребер жесткости, устанавливаемых по всей высоте вертикального листа балки, в интервалах между ними иногда ставят укороченные ребра жесткости треугольного очертания. Их высота составляет примерно $h_B/3$. Укороченные ребра (треугольники жесткости) иногда ставят при воздействии на пояс балки сосредоточенных грузов большой массы. Как правило, наличие таких ребер нежелательно, так как осесимметричное их расположение относительно оси вызывает при сварке искривление балки в вертикальной плоскости.

В балках большой высоты $h \geq 2,5 \dots 3,0$ м иногда ставят горизонтальные ребра жесткости. Их располагают на расстоянии $s = (1/4 \dots 1/5)h_B$ от верхнего горизонтального листа (рис. 4.2, в).

При отсутствии в балке подвижных нагрузок рекомендуется постановка ребер жесткости с одной стороны. Это дает экономию металла, но способствует образованию достаточного деформирования от несимметрично уложенных швов.

4.3. Расчет балок с учетом пластических деформаций

Рассмотрим сопротивление элемента при изгибе нагруженной балки, например, как показано на рис. 4.3, а, б. Элемент имеет тавровое поперечное сечение (рис. 4.3, в).

В первой упругой стадии работы элемента напряжение распределяется в поперечном сечении по прямолинейному закону (рис. 4.3, г). Элемент в первой стадии работает, пока напряжение в крайнем волокне материала не станет равным σ_T (рис. 4.3, д).

Во второй упругопластической стадии часть материала поперечного сечения элемента работает упруго, а часть упругопластично.

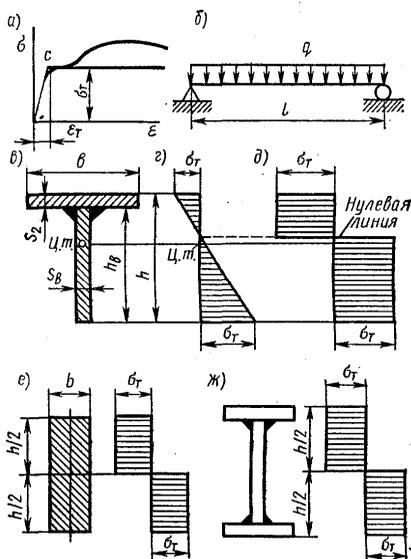


Рис. 4.3. Расчет балок на изгиб с учетом упругопластических деформаций:

а — схематизированная диаграмма деформаций; б — изгибаемая балка; в, г, д — упругие и пластические деформации в поперечном сечении балки таврового профиля; е — то же, прямоугольного; ж — то же, двутаврового

В третьей пластической стадии работы поперечного сечения элемента упругая зона практически исчезает. Это предельная стадия. Равновесие между внешними и внутренними силами нарушается. Поперечное сечение балки начинает работать как пластический шарнир. Деформации элемента интенсивно растут. Такое состояние рассматривается как разрушение балки.

При образовании пластического шарнира нулевая линия, разделяя сечение на две равные части, смещается вверх относительно центра тяжести (рис. 4.3, в). При этом напряжение в крайних волокнах

$$\sigma = \frac{M_T}{2S}, \quad (4.8)$$

где M_T — изгибающий момент, при котором образуется пластический шарнир (все сечение охвачено текучестью); S —

статический момент половины площади поперечного сечения изгибаемого элемента относительно его центра тяжести.

При расчете по пластическому методу допускаемый момент

$$M_{\text{дон}} = \frac{M_T}{k} = \frac{\sigma_T \cdot 2S}{k}, \quad (4.9)$$

где k — коэффициент запаса прочности, равный 1,7 или 1,5

С другой стороны, по теории упругих деформаций

$$M_{\text{дон}} = \frac{\sigma_T W}{k}. \quad (4.10)$$

Учет пластичности позволяет при изгибе заменить W величиной $2S$.

Рассмотрим несколько примеров определения отношения

а) элемент имеет прямоугольное поперечное сечение (рис. 4.2, е)

$$W = \frac{bh^2}{6}; \quad S = \frac{bh^2}{4}; \quad \frac{2S}{W} = 1,5 \quad (4.11)$$

б) элемент имеет двутавровый профиль (рис. 4.2, ж).

Если принять площадь одного пояса равной половине площади вертикальной стенки, то $\frac{2S}{W} = 1,13$

В нормальных прокатных двутаврах $\frac{2S}{W} = 1,13...1,18$.

Расчет балок по методу пластических деформаций применяется исключительно при действии на конструкцию статических нагрузок.

4.4. Работа балок на кручение

В тех случаях, когда балки работают на кручение, двутавровый профиль применять не целесообразно. Напряжение от кручения в незамкнутых профилях (двутавровых, угловых и т. п.) (рис. 4.4, а, б)

$$\tau = \frac{M_{\text{кр}} s_{\text{max}}}{\alpha \sum v_i s_i^3 a_i}, \quad (4.12)$$

где $M_{\text{кр}}$ - крутящий момент; v_i - коэффициент, зависящий от отношения s_i/a_i , может быть принят равным 0,33; $\alpha = 1$ — для

уголка, $\alpha = 1,3$ —для двутаврового профиля; a_i — больший размер сечения элемента; s_i — меньший размер того же сечения; s_{\max} — наибольшая толщина профиля.

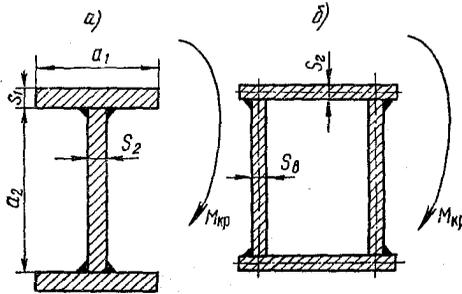


Рис. 4.4. К расчету балки на кручение:
 а — двутавровый открытый профиль; б — трубчатый закрытый профиль

Так как момент сопротивления, как правило, невелик, то напряжение τ значительно.

При двутавровом профиле

$$\alpha \sum v_i s_i^3 a_i = 0,43 (s_B^3 h_B + 2s_{II}^3 a_{II}). \quad (4.13)$$

При кручении целесообразно применение сварных балок коробчатого поперечного сечения. Напряжение от крутящего момента с достаточной степенью точности может быть найдено по формуле:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{2As_{\min}}, \quad (4.14)$$

где A - площадь сечения прямоугольника (рис. 4.4, б), ограниченного штрихпунктирными линиями; s_{\min} — наименьшая толщина вертикального или горизонтального листа.

Так как площадь A велика, то напряжение τ оказывается незначительным.

Эффективность применения коробчатых сечений по сравнению с открытыми при кручении весьма велика.

4.5. Сварные соединения

Горизонтальные листы соединяются с вертикальными поясными швами. Они, как правило, угловые (1) и в редких случаях при наличии сосредоточенных перемещающихся грузов

большого веса или при действии переменных нагрузок с подготовкой кромок (2) (рис. 4.5).

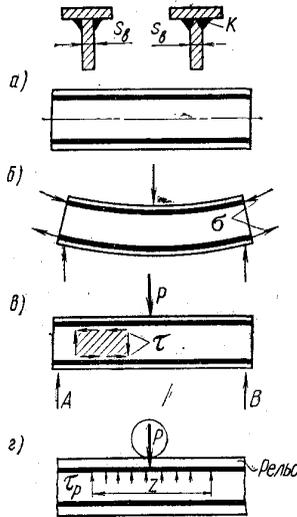


Рис. 4.5. К расчету поясных швов сварных балок:

а — типы швов; б — связующие напряжения σ от изгиба; в — рабочие напряжения τ ; г — образование в швах рабочих напряжений τ_p под сосредоточенной силой

Если балка (рис. 4.5, а) работает на поперечный изгиб, то в поясных швах вследствие совместной деформации шва и основного металла возникают связующие нормальные напряжения σ , которые в учет не принимаются (рис. 4.5, б), и рабочие касательные напряжения τ (рис. 4.5, в). Поясные швы обеспечивают работу на изгиб всего сечения как единого целого. Срезающие усилия на уровне крайних кромок вертикального листа на единицу длины определяются по формуле

$$\tau = \frac{Q \cdot s}{J}, \quad (4.15)$$

где S — статический момент площади пояса относительно центра тяжести сечения; Q — поперечная сила в сечении.

Роль касательных напряжений τ существенна, несмотря на то, что они часто невелики по значению. В двусторонних швах с катетом K касательные напряжения

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{2J\beta K}, \quad (4.16)$$

где β — коэффициент, равный для ручной сварки 0,7; J — момент инерции сечения.

При наличии в вертикальном листе подготовки кромок касательные напряжения определяются по формуле

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{Js_B}. \quad (4.17)$$

При сварке конструкций, у которых толщина листов $s_B \geq 4$ мм, принимаем $K \geq 4$ мм.

Прерывистые швы не целесообразны, так как при этом затрудняется применение автоматической сварки и возникает дополнительная концентрация напряжений.

При наличии в балке сосредоточенных перемещающихся грузов поясные швы принимают некоторое участие в передаче нагрузки с горизонтального листа на вертикальный (рис. 4.5, г). Это имеет место вследствие неплотного их взаимного соприкосновения. Если груз перемещается по рельсу, прикрепленному к поясу балки, то напряжение τ в поясных швах определяется по формуле

$$\tau = \frac{nP}{2z\beta K}, \quad (4.18)$$

где P — вес сосредоточенного груза; n — коэффициент, зависящий от характера обработки кромок вертикального листа (обычно $n=0,4$); z — расчетная длина шва, по которой происходит передача давления с пояса на вертикальный лист (определяется по формуле (3.25)).

В ряде случаев, например, в подкрановых или крановых балках, поясные швы в верхней зоне в результате локального действия сосредоточенных сил P испытывают значительные усилия. При этом их целесообразно оформлять с катетами в отношении 1,5:1 или 2:1 с обеспечением глубокого проплавления.

При расчете целесообразно принять $\beta = 0,7$, несмотря на автоматический метод сварки.

После вычисления τ_p определяют условное результирующее напряжение:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau^2 + \tau_p^2} \leq [\tau]. \quad (4.19)$$

Швы, приваривающие ребра жесткости, как правило, на прочность расчетом не проверяются. Они выполняются угловыми с катетом, составляющим (0,3...0,6) от толщины вертикального листа s_v . Эти швы в опорных сечениях, а также в местах приложения сосредоточенных сил непременно выполняют непрерывными. Ребра жесткости вне опорных сечений в наиболее напряженных волокнах растянутой зоны иногда не приваривают.

В балках, работающих под статической нагрузкой, рекомендуется укладка односторонних угловых поясных швов при автоматической сварке и соответственно с глубоким проплавлением. Также возможна укладка односторонних швов при приварке ребер жесткости.

Контрольные вопросы:

1. От каких факторов зависит высота изгибаемой балки и можно ли ее назначать произвольно?
2. По какой формуле назначается высота балки из условия минимума веса?
3. Можно ли ожидать, что требуемые высоты балок, определенные из форм жесткости и минимума веса, будут близкими между собой?
4. Как произойдет подбор сечений балки, если задана ее высота?
5. Какие виды напряжений следует проверить в подобранном сечении балки?
6. Какие отклонения расчетных напряжений от допускаемых являются приемлемыми и почему?
7. В каких сечениях и на каком горизонте проверяют нормальные напряжения от изгиба и по какой формуле?
8. В каких сечениях производят определение эквивалентных напряжений и по какой формуле?
9. От каких причин происходит потеря общей устойчивости балки и как следует предотвращать это явление?
10. По каким причинам происходит потеря местной устойчивости вертикального листа (от каких напряжений)?

11. Какие мероприятия принимаются для повышения местной устойчивости?

12. По каким формулам производят проверку местной устойчивости?

13. По каким формулам определяют напряжения от крутящего момента в балках двутаврового и коробчатого профилей?

14. Какая гипотеза лежит в основе расчета балок на изгиб с учётом пластических деформаций?

15. По какой формуле производят проверку напряжений при изгибе балок с учетом пластических деформаций?

16. Какие разновидности сварных соединений имеются в балках?

17. Каковы формы поясных швов при нормальном и тяжело режимах работы балок?

18. По каким формулам определяются напряжения в поясных швах при отсутствии сосредоточенных подвижных нагрузок?

19. Как определяют местные напряжения в сварных поясных швах под сосредоточенными нагрузками?

Лекция № 5 **Сварные балки**

План:

5.1. Стыки балок

5.2. Применение штампованных и гнутых профилей

5.3. Балки из алюминиевых сплавов

5.4. Опорные части балок

5.5. Пути повышения усталостной прочности балок

5.1. Стыки балок

Расчет прочности стыков балок производится обычно на изгиб. Напряжение в стыке определяется как

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma]_p. \quad (5.1)$$

Если допускаемое напряжение в соединении (в шве или прилегающей к шву зоне) $[\sigma']_p \leq [\sigma]_p$, то такой стык оказывается не равнопрочным целому сечению. В этом случае стыки целесообразно помещать в сечениях, удаленных от зон

максимальных моментов, чтобы выполнялось условие $\sigma \leq [\sigma']_p$. Если $\sigma \geq [\sigma']_p$, а стык должен находиться в зоне, где М имеет максимальное значение, то допускается произвести местное усиление балки привариванием к ее поясу дополнительных горизонтальных листов, увеличивающих момент инерции и момент сопротивления в расчетном сечении. При этом

$$\sigma = \frac{M}{W'} \leq [\sigma']_p, \quad (5.2)$$

где W' — момент сопротивления сечения усиленной балки. К накладкам прибегают редко, так как они являются источником образования концентрации напряжений и их применение ухудшает работу балок под переменными нагрузками.

В некоторых случаях стыки проектируют косыми. Это неудобно в технологическом отношении. Более рационально применение обычных стыков, выполненных технологическими процессами высокого качества.

5.2. Применение штампованных и гнутых профилей

Типы поперечных сечений балок из штампованных и гнутых профилей показаны на рис. 5.1.

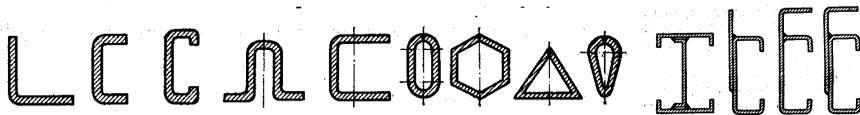


Рис. 5.1. Облегченные конструкции балок из гнутых и штампованных профилей

Как правило, эти конструкции тонкостенные ($s=1...5\text{мм}$). Рационально применение в балках тонкостенных штампованных и гнутых элементов, соединенных контактной точечной сваркой (рис. 5.2, а...э).

Дуговая сварка гнутых профилей осложняется, если укладку шва производят по зоне пластической деформации, вызванной в процессе изготовления элемента.

В этих зонах возможно старение металла, т. е. ухудшение пластических свойств и образование трещин. Сварные точки и швы располагают в местах, удаленных от зон пластического деформирования.

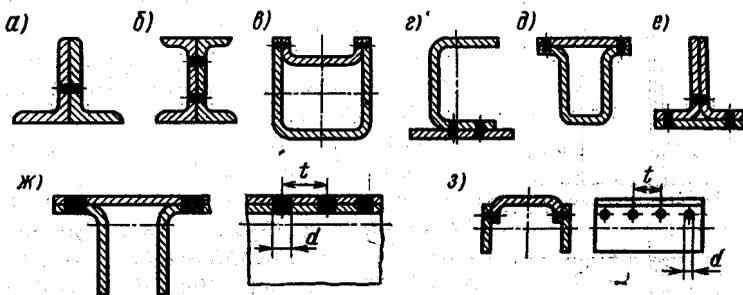


Рис. 5.2. Примеры поперечных сечений балок, сваренных точечной сваркой:

а, б - связующие соединения; в-з — рабочие соединения

В поперечных сечениях балок, изображенных на рис. 5.2, а, б, точки являются связующими. Они не несут рабочих усилий и расчету на прочность не подлежат. В сечениях балок, изображенных на рис. 5.2, в, точки являются рабочими. Срезающее усилие на единицу длины балки определяется по формуле (4.12). Касательное усилие на участке балки длиной, равной расстоянию между точками, определяют по формуле

$$T = \frac{Q \cdot S}{J} t. \quad (5.3)$$

Шаг t , который является расстоянием между точками, должен быть не более $30s_{\min}$ в сжатой зоне не более 40 в растянутой, где s_{\min} минимальная толщина стенки.

Срезающие напряжения в точке находятся по формуле

$$\tau = \frac{T}{2\pi \frac{d^2}{4}}, \quad (5.4)$$

где d — диаметр точки (в сечении находятся две точки). Обычно рабочие напряжения точек в конструкциях указанного типа незначительны.

5.3. Балки из алюминиевых сплавов

Для алюминиевых балок рекомендуется применение сплавов АВ (Al +Mg+Ni), алюминиево-магниевых (AMг5, AMг6, AMг61), алюминиево-магниево-цинковых (В92). В этих сплавах в зависимости от состояния и термической обработки пределы

прочности стыковых сварных соединений σ'_B составляют $(0,6...0,9)\sigma_B$. Чем прочнее сплав, тем ниже коэффициент. Для повышения прочности стыковых соединений в отдельных случаях применяют косые швы. Целесообразно применение прессованных, штампованных и гнутых профилей.

При конструировании алюминиевых балок следует избегать концентрации напряжений, особенно в зонах сварных соединений. На рис. 9.11 показана конструкция узла сопряжения сварных балок из алюминиевых сплавов. Швы располагаются вне зоны наибольших нормальных напряжений и зон со значительными концентраторами напряжений.

Конструкции из алюминиевых сплавов имеют значительно меньшую жесткость по сравнению со стальными. Балкам для различных элементов конструкций целесообразно устанавливать следующие значения f/l :

Подкрановые балки (грузоподъемность крана 50 т)...	1/600
Балки междуэтажных перекрытий.....	1/400...1/200
Балки покрытий.....	1/250...1/200

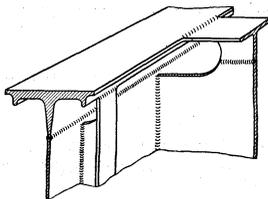


Рис. 5.3. Конструкция сварного узла балок из алюминиевых сплавов

5.4. Опорные части балок

Опорные части балок, чтобы обеспечить шарнирность опирания, часто конструируют в форме выпуклых плит. Изготовление плоских плит нерационально. При очень больших нагрузках опорные части выполняют сварными. Пример конструкции опорной выпуклой плиты приведен на рис. 5.4.

На одной из опор балка, как правило, имеет продольную подвижность, на другой — она закреплена болтами или штырями. Ширина опорной плиты b_0 принимается равной $(1,1...1,2)b$, длина плиты $a = (1,0...1,5)b$.

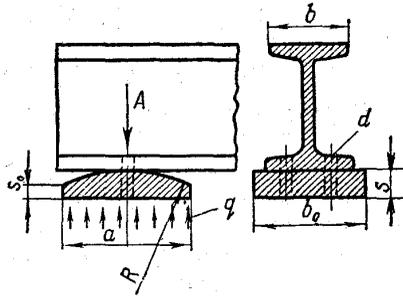


Рис. 5.4. Конструкция опорной части балки

Плиты изготавливают стальными: толщина их у конца $s_0=10\ldots15$ мм, радиус цилиндрической поверхности $R=1\ldots2$ мм. Толщина плиты на оси находится из условия ее прочности при работе на изгиб. Реактивные усилия, действующие на единицу длины плиты, обозначим q . От нагрузки на оси плиты образуется поперечная сила

$$Q = \frac{qa}{2} = \frac{A}{2}. \quad (5.5)$$

Изгибающий момент по оси плиты

$$M = \frac{qa^2}{8} = \frac{Aa}{8}. \quad (5.6)$$

Момент сопротивления сечения плиты, ослабленной отверстиями штырей, определяется из соотношения

$$W = (b_0 - 2d) \frac{s^2}{6}. \quad (5.7)$$

Требуемая толщина плиты

$$s = \sqrt{\frac{6W}{b_0 - 2d}}. \quad (5.8)$$

5.5. Пути повышения усталостной прочности балок

Радикальным путем повышения усталостной прочности является устранение концентрации напряжений.

При испытаниях сварных балок под статической нагрузкой установлено, что остальные сварные балки обладают необходимой прочностью, однако распределение напряжений в них по поперечному сечению происходит неравномерно. В

широких горизонтальных листах балок двутаврового профиля напряжения у оси больше, чем по кромкам. При наличии прерывистых поясных швов сечение балки не работает как одно целое. В зоне кромок вертикального листа наблюдается концентрация напряжений. При непрерывных швах она значительно меньше. Концентрация напряжений имеет место и в случае приложения к поясу балки сосредоточенной силы (колеса крана). Чем больше жесткость пояса балки с приваренным к нему рельсом, тем на большую зону вертикального листа распределяется сосредоточенная сила и тем меньше концентрация напряжений. Поясные швы двутавровых балок в случае смещения оси кранового пути относительно оси балки нередко работают неудовлетворительно.

Сварные балки хорошо работают под переменными нагрузками при условии, если рационально выбраны формы конструкций и технологический процесс сварки. Эти балки должны быть выполнены таким образом, чтобы уменьшить возможность образования в них концентраторов напряжений. Все стыки элементов по длине должны быть сварены стыковыми швами без применения накладок. На рис. 5.5, а показаны примеры стыков горизонтальных листов с плавным изменением их толщины и ширины. На рис. 5.5, б — рациональные обрывы накладок. Ребра жесткости целесообразно приваривать так, как это показано на рис. 5.5, в. К растянутому поясу и в растянутой зоне вертикального листа на длине $a=(0,1...0,2)l$ ребра жесткости не рекомендуется приваривать вовсе ($b \approx 0,5a$).

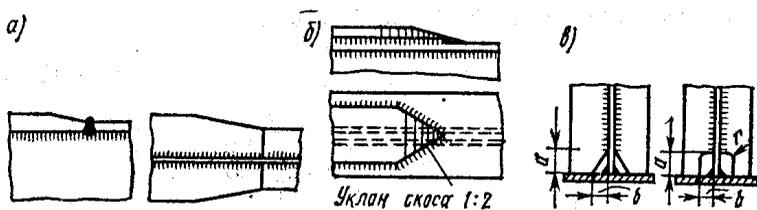


Рис. 5.5. Конструктивное оформление балок, работающих под переменными нагрузками

На рис. 5.6 приведены примеры сварных балок из низкоуглеродистой стали и их пределы выносливости при пульсирующих нагрузках.

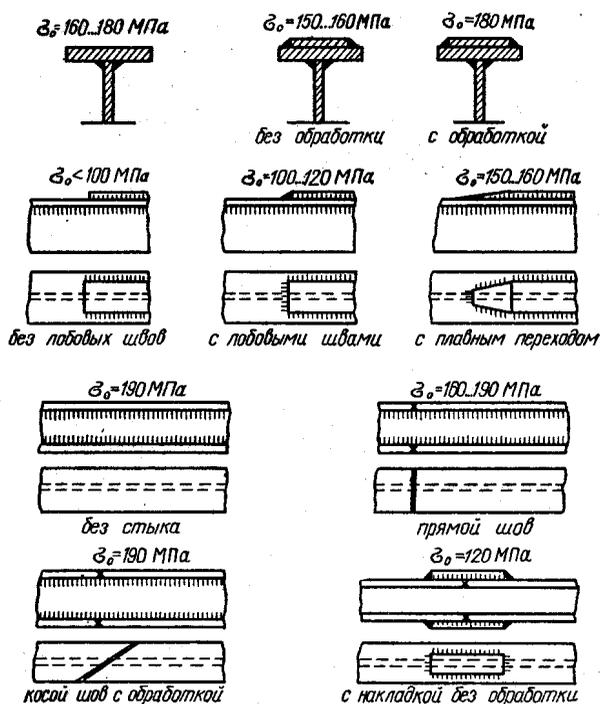


Рис. 5.6. Пределы выносливости сварных балок

Испытания показали, что применение накладок, приваренных к поясам угловыми швами, значительно снижает усталостную прочность конструкции. Наибольшей усталостной прочностью обладают балки без стыков и с косыми механически обработанными стыковыми соединениями.

Контрольные вопросы:

1. Как классифицируются стыки балок?
2. Какие стыки рекомендуют в балках при статической и переменной нагрузках?
3. Каковы профили сечений балок из штампованных и гнутых элементов?
4. Каковы технико-экономические преимущества указанных профилей по сравнению с прокатными?
5. В чем особенность работы алюминиевых балок по сравнению со стальными в отношении жесткости, общей и местной устойчивости?

6. Каковы типы опорных плит балок?
7. По какой формуле определяют толщину плиты по ее оси?

Лекция № 6

Сварные стойки

План:

- 6.1. Типы поперечных сечений стоек
- 6.2 Прочность и устойчивость стоек со сплошными поперечными сечениями при центральном приложении усилия
- 6.3. Прочность и устойчивость стоек при эксцентрично приложенной силе
- 6.4. Расчет устойчивости стойки, имеющей поперечное сечение со свободной осью

6.1. Типы поперечных сечений стоек

Поперечные сечения стоек имеют различную форму. Она зависит от значения, усилий, наличия эксцентриситета, длины стойки, конструкции опорных закреплений, общей компоновки объекта. Сжатые элементы должны быть не только прочны, но и устойчивы. Поэтому поперечные сечения сжатых элементов должны обладать возможно большей жесткостью по всем направлениям.

При небольших продольных усилиях применяют стойки, имеющие сечение уголка (рис. 6.1, а). Однако они обладают малой жесткостью и применяются преимущественно в коротких элементах. Сечения, представленные на рис. 6.1, б, в, рациональны в отношении жесткости, но не удобны для окраски и связаны с большим количеством сварочных работ. Наиболее распространено сечение, изображенное на рис. 6.1, г. Уголки по длине элемента соединяют между собой прокладками. Для стоек под легкие нагрузки целесообразны трубчатые и гнутые профили (рис. 6.1, в, и, к) из стали толщиной 1...6 мм, сваренные дуговой или контактной точечной сваркой. Для изготовления стоек, работающих при продольных усилиях до нескольких сотен кН, применяют Н-образные двутавровые профили (рис. 6.1, д), которые во многих случаях наиболее рациональны. Нередко используются для стоек широкополочные двутавры. Открытые швеллерные профили (рис. 6.1, ж, з) применяют, чтобы при

наименьшей площади получить значительный момент инерции. Трубчатые профили (рис. 6.1, е, и, к) иногда используют в станинах.

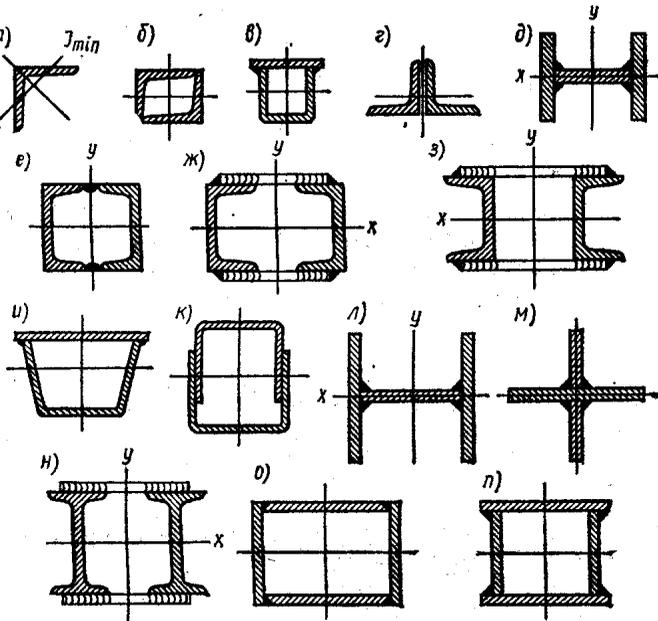


Рис. 6.1. Поперечные сечения сжатых элементов

Рациональные конструкции стоек, работающих при продольных усилиях, составляющих тысячи кН, приведены на рис. 6.1, л...н. Закрытые сечения (рис. 6.1, о, п) выгодны в конструкциях различного рода рам и станин. В сжатых элементах иногда применяют цельнотянутые и сварные трубы.

6.2 Прочность и устойчивость стоек со сплошными поперечными сечениями при центральном приложении усилия

Расчет на прочность и устойчивость стоек, работающих при центральном сжатии, производится по формуле

$$\sigma = -\frac{N}{A} \leq [\sigma]_p \varphi. \quad (6.1)$$

При введении в расчетную формулу коэффициента $\varphi < 1$ обеспечивается расчетная устойчивость сжатого элемента при

продольном изгибе. Величина $\varphi < 1$ зависит от гибкости сжатого элемента.

Гибкостью λ называют отношение свободной длины элемента l к радиусу инерции r поперечного сечения гибкого элемента:

$$\lambda = \frac{l}{r}. \quad (6.2)$$

Радиус инерции

$$r = \sqrt{\frac{J}{A}}. \quad (6.3)$$

В направлении, где радиус имеет наименьшее значение, гибкость элемента наибольшая. Для конструкции, шарнирно закрепленной по концам (рис. 6.2, а), свободная длина l принимается равной длине стойки. При этом гибкость стойки определяется формулой (6.2). Примерами подобных конструкций могут служить элементы сжатых поясов ферм.

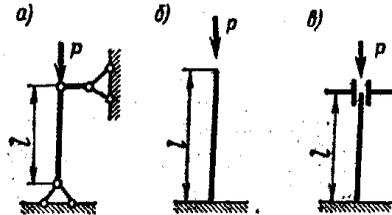


Рис. 6.2. Расчетные схемы стоек

В конструкции, имеющей один защемленный конец (рис. 6.2, б), гибкость

$$\lambda = \frac{2l}{r}. \quad (6.4)$$

У стоек с защемленными концами (рис. 6.2, в), один из которых (нижний) неподвижен, а другой (верхний) обладает продольной подвижностью,

$$\lambda = \frac{0,5l}{r}. \quad (6.5)$$

Во избежание местной потери устойчивости стенку стойки подкрепляют продольными ребрами жесткости.

Значения коэффициентов φ определяются согласно СНиП в зависимости от гибкости элемента λ от величины расчетного сопротивления R , которое принимается $R \approx 0,9\sigma_T$

Часто напряжения в сжатых элементах проверяют по преобразованной формуле

$$\sigma = -\frac{N}{A\varphi} \leq [\sigma]_{сж} = [\sigma]_p \quad (6.6)$$

При этом произведение $A\varphi$ называют приведенной площадью сжатого элемента. Трудность подбора сечения сжатого элемента при заданном значении силы N состоит в том, что допустимое напряжение является функцией коэффициента φ , а последний зависит от поперечного сечения, которое еще не подобрано.

Для подбора поперечного сечения стоек пользуются методом последовательного приближения. Первоначально задаются коэффициентом $\varphi_1=0,5...0,8$ в зависимости от рода конструкции. Можно принять среднее значение $\varphi_1=0,65$. По заданному коэффициенту определяют требуемую площадь поперечного сечения элемента, пользуясь формулой (6.1). Затем проектируют сечение, которое обозначим A_2 , находим в нем наименьшее значение момента инерции J_{\min} , наименьший радиус инерции r_{\min} , наибольшую гибкость $\lambda_{\max} = l/r$ и коэффициент φ_2 , соответствующий значению λ_{\max} . Определяют напряжение в спроектированном сечении $\sigma = N/(A_2\varphi_2)$, которое должно быть близким к $[\sigma]_p$. Допустимы отклонения σ от $[\sigma]_p$ в пределах 5%. В противном случае размеры поперечных сечений элементов изменяют в требуемом направлении. Обычно на второй или третьей стадии подбора сечения результаты оказываются удовлетворительными.

6.3. Прочность и устойчивость стоек при эксцентрично приложенной силе

Если сила приложена к элементу эксцентрично, то следует сделать три проверки устойчивости.

Во-первых, проверить прочность от М и N по формуле (6.7):

$$\sigma = \pm \frac{M}{W} - \frac{N}{A} \leq [\sigma]_p. \quad (6.7)$$

Во-вторых, проверить устойчивость от силы N в плоскости действия М, совпадающей, как правило, с направлением наибольшей жесткости сечения. Устойчивость стержней зависит от пределов текучести. С их увеличением коэффициент устойчивости φ понижается. Это обстоятельство учитывается коэффициентом условной гибкости:

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R}{E}}. \quad (6.8)$$

С повышением σ_T сталей растет сопротивление R, а следовательно $\bar{\lambda}$. Коэффициент φ заменяется коэффициентом φ_m :

$$\sigma = -\frac{N}{A\varphi_m} = [\sigma]_p. \quad (6.9)$$

Для сплошных сечений, у которых оси материальные, т. е. пересекающие сечение, коэффициент φ определяется в зависимости от величины $\bar{\lambda}$ и $m\eta$.

Относительный эксцентриситет

$$m = \frac{M}{W} : \frac{N}{A}, \quad (6.10)$$

где η - коэффициент формы, может быть принят 1; 2.

В-третьих, проверить устойчивость от силы N в плоскости наибольшей гибкости, как правило, перпендикулярной плоскости действия момента М с учетом изгибно-крутильной формы потери устойчивости.

В этом случае проверка, проводимая по формуле

$$\sigma = -\frac{N}{c\varphi_{\min}A} \leq [\sigma]_p \quad (6.11)$$

показывает, что φ_{\min} соответствует направлению наибольшей гибкости стойки

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m}. \quad (6.12)$$

Приближенно можно принять $\beta = 1$, $\alpha = 0,7$; для коробчатых профилей $\alpha = 0,6$.

По гибкости λ_x в плоскости наибольшей гибкости, как правило, перпендикулярной моменту, определяется φ_{\min} .

Необходимые площади поперечного сечения определяют также методом последовательного приближения. Если пренебречь напряжением от момента, то требуемая площадь сечения

$$A_{тр} = \frac{N}{[\sigma]_p \varphi}. \quad (6.13)$$

Задаваясь пониженным значением $\varphi = 0,4 \dots 0,6$, определяют $A_{тр}$. Конструируют поперечное сечение и производят проверку его прочности и устойчивости по формулам (6.7), (6.9), (6.11). Если напряжение отклоняется от допускаемого больше, чем на $\pm 5\%$, то размеры сечения меняют и вторично проверяют его прочность и устойчивость.

6.4. Расчет устойчивости стойки, имеющей поперечное сечение со свободной осью

Каждая из частей, образующих составное сечение стойки, называется его ветвью. В стойках с составными поперечными сечениями ветви соединяют связями. Наиболее часто в качестве связи применяют соединительные планки (рис. 6.3, а).

В сжатых элементах с составными поперечными сечениями устойчивость относительно материальной и свободной осей проверяется различными путями. Проверку устойчивости элемента относительно материальной оси, пересекающей сечение (ось x для конструкции, изображенной на рис. 6.3, а), производят так же, как и для элементов со сплошными поперечными сечениями.

При проверке устойчивости стойки относительно свободной оси, не пересекающей сечение (ось y на рис. 6.3, а), коэффициент φ находят не как функцию гибкости λ_y , а как функцию приведенной гибкости:

$$\lambda_0 = \sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}. \quad (6.14)$$

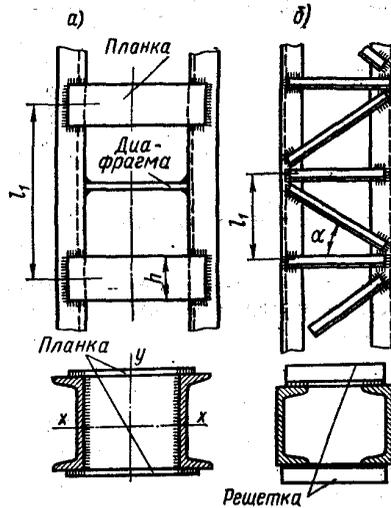


Рис. 6.3. Связи в стойках:

а — соединительные пленки; б — соединительная решетка

Величину вычисляют при допущении, что ось поперечного сечения материала. Гибкость одной ветви на длине l

$$\lambda_1 = \frac{l_1}{r_1}. \quad (6.15)$$

Планки рекомендуется расставлять таким образом, чтобы гибкость $\lambda \leq 40$. В качестве расчетного принимают наибольшее из значений λ_x и $\lambda_0 /$

На рис. 6.3, б показаны связи в стойках в форме соединительной решетки.

Контрольные вопросы:

1. Какие элементы конструкции называют стойками?
2. Какие типы сечений применяют для стоек при небольших и больших усилиях?
3. Что называется гибкостью стойки?
4. Что называется радиусом инерции поперечного сечения и как он определяется?
5. Какие допускаемые напряжения применяются при расчете стоек?

6. Как определяется гибкость в зависимости от опорных закреплений стоек?

7. Как проверяется напряжение в стойке при заданном усилии и сечении?

8. Как определяется допускаемое усилие сжатия в стойке заданного сечения при заданном допускаемом напряжении?

9. Как подбирают сечение в сжатой стойке при заданном усилии и допускаемом напряжении?

10. В чем состоит способ последовательного приближения подбора сечения в сжатых стойках?

11. Какие оси в поперечном сечении называются материальными и свободными?

12. В зависимости от каких факторов делается проверка устойчивости стойки в плоскости ее наибольшей гибкости?

Лекция № 7 **Сварные стойки**

План:

7.1. Соединительные элементы стоек

7.2. Стыки стоек

7.3. Базы и оголовки стоек

7.4. Примеры конструкций стоек

7.1. Соединительные элементы стоек

При загрузении стойки силой, приложенной центрально, поперечная сила $Q=0$. В действительности в стойке могут существовать незначительные искривления оси и незначительные эксцентриситеты приложения силы. Эти обстоятельства вызывают появление поперечной силы. На основе многочисленных экспериментов при загрузении стойки силой, действующей вдоль оси, условную поперечную силу выражают разными путями. Например, можно приближенно определять по эмпирической формуле:

$$Q_{усл} = 200A, \text{ Н}, \quad (7.1)$$

где A — площадь поперечного сечения стойки, см^2 .

Этой формулой следует пользоваться при расчете стоек из низкоуглеродистой стали, а также из сплава АМгб.

При расчете конструкций из стали повышенной прочности и сплава Д16Т целесообразно пользоваться другой условной формулой:

$$Q_{усл} = 400A, \text{ Н}, \quad (7.2)$$

В конструкции, изображенной на рис. 7.1, а, в стойке возникает реальная поперечная сила Q , равная горизонтальной реакции:

$$Q = \frac{Pe}{l}. \quad (7.3)$$

Когда в стойках реальные поперечные силы больше, чем условные, определенные по формулам (7.1) и (7.2), то в качестве расчетной принимают реальную поперечную силу Q .

В сжатых стойках, имеющих сплошные поперечные сечения, соединительными элементами являются сварные швы. Их конструируют непрерывными (рис. 7.1, б). Расчетным усилием в соединительных швах является поперечная сила: реальная, если она существует, и условная, определяемая по формуле (7.1) или (7.2). В последнем случае должно выполняться условие $Q < Q_{усл}$.

Касательные напряжения в соединительных швах определяют по формуле

$$\tau = \frac{QS}{2JK\beta}, \quad (7.4)$$

где J - момент инерции всего сечения относительно оси; S — статический момент площади пояса (рис. 7.1, б, в).

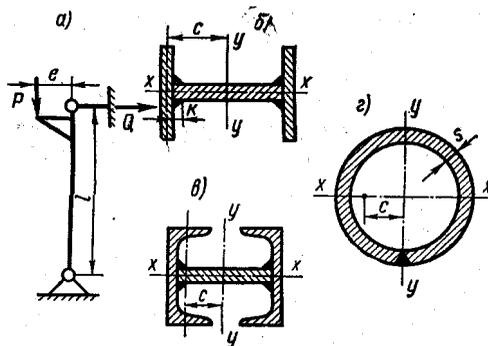


Рис. 7.1. Схема конструкции (а) и поперечные сечения (б...г) стоек, работающих при поперечной силе Q

Для конструкции, изображенной на рис. 7.1, а срезающие напряжения в продольном шве определяются по формуле

$$\tau = \frac{QS}{2Js}, \quad (7.5)$$

где $S = A \cdot e$; A — площадь полукольца; s — толщина стенки; e — расстояние от центра тяжести полукольца от центра трубы.

В большинстве случаев напряжения в швах от поперечной силы оказываются незначительными. Тем не менее размер катета шва следует принимать $K \geq 4$ мм, если наименьшая толщина соединяемых элементов больше 4 мм.

В стойках составного поперечного сечения планки между ветвями стойки целесообразнее сваривать стыковыми швами, так как при этом число швов, требуемых для прикрепления планок, меньше, чем при других способах соединений (рис. 7.2, а). Однако вследствие технологических трудностей чаще применяются соединения с угловыми швами (рис. 7.2, б). Ширина планки h определяется при расчете на прочность. Учитывая требование жесткости, ширина планки $h \geq 0,5b$. Толщина планки должна быть $b_0 / s \leq 50$, где b_0 — расстояние между ветвями, см.

Ветви поперечного сечения сжатого элемента дополнительно соединяют между собой диафрагмами, расположенными перпендикулярно оси элемента. Назначение диафрагм — препятствовать скручиванию профиля, которое может произойти из-за взаимного смещения ветвей. Число диафрагм в элементе зависит от его длины, но не должно быть меньше двух. Диафрагмы на прочность не рассчитывают. Их геометрические размеры зависят от расстояния между ветвями и от поперечного сечения стойки. Толщина диафрагмы равна толщине соединительной планки.

Конструирование сжатых составных элементов только с одними диафрагмами, без соединительных планок или решетки, неприемлемо, так как при этом обе ветви стойки работают раздельно, а не как одно целое. Расчет прочности планки производится в основном на изгибающий момент:

$$M = \frac{Ql_1}{4}, \quad (7.6)$$

где l_1 — расстояние между осями планок; Q — поперечная сила.

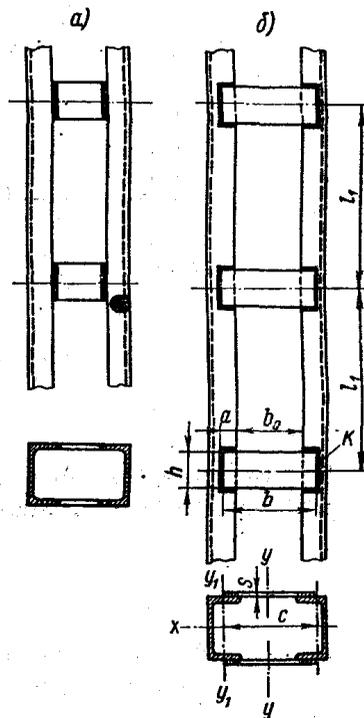


Рис. 7.2. Стойки с соединительными швами

Напряжение в планке, вызванное изгибающим моментом

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma]_p, \quad (7.7)$$

где $W = \frac{sh^2}{6}$.

Наименьшая требуемая ширина планки определяется по формуле

$$h = \sqrt{\frac{6M}{sh^2[\sigma]_p}}. \quad (7.8)$$

Если соединение планок со стойкой стыковое, то напряжение в швах определяется из условия

$$\sigma = \frac{6M}{sh^2} \leq [\sigma']_p. \quad (7.9)$$

Если планки приварены угловыми швами (рис. 7.2, б), то из условия прочности определяются формулой

$$M = \frac{\tau h^2 \beta K}{6} + \tau \beta K a (h + K). \quad (7.10)$$

7.2. Стыки стоек

Соединения стоек по длине можно производить несколькими способами. Стыковые соединения сваривают прямым швом (рис. 7.3, а, б).

Как правило, в таких соединениях напряжение существенно меньше, чем допускаемое, так как по условию устойчивости $\sigma \leq [\sigma]_p \varphi$ и поэтому прочность такого соединения обеспечена. Стыковые соединения, выполненные прямым швом с накладкой (рис. 7.3, в), применяются для стоек, имеющих составные поперечные сечения. При этом стыковые накладки служат одновременно соединительными планками.

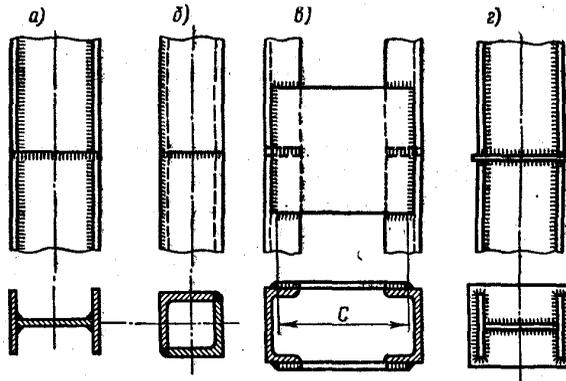


Рис. 7.3. Стыки стоек

На рис. 7.3, г показаны соединения с помощью прокладок. Так как часть сил передается по плоскости соприкосновения двутавра с прокладкой, то допускаемые напряжения при расчете сварных швов могут быть повышены до значения $[\sigma]_{сж}$. Прочность швов проверяется по формуле

$$L \geq \frac{N}{\beta K [\sigma]_{сж}}, \quad (7.11)$$

где L — длина периметра швов, приваривающих сечение стойки к прокладке.

7.3. Базы и оголовки стоек

Пример конструкции базы и оголовка стойки приведен на рис. 7.4.

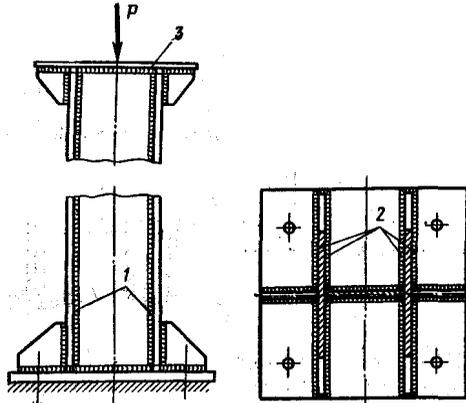


Рис. 7.4. Пример базы и оголовка стойки

База сконструирована в форме плиты, к которой стойка приваривается тавровым соединением. Плита опирается на фундамент и крепится к нему четырьмя болтами. Для равномерного распределения давления под плитой её делают жесткой. Для этого использованы шесть ребер жесткости, установленных в плоскостях стенки и поясов стойки. Вертикальные швы 1 нагружены слабо. Они воспринимают лишь фиктивную поперечную силу, которая, как правило, мала. Нижние швы 3 в тавровом соединении передают часть нагрузки P со стойки на плиту, в то время как другая часть нагрузки передается через плоскость соприкосновения стойки с плитой. Вследствие изгиба плиты все швы, лежащие в горизонтальной плоскости, испытывают напряжения от поперечной силы, точное определение которой представляет трудности. Швы делают непрерывными; катет шва имеет величину $K=(0,75...1,0)s$, где s — толщина ребра жесткости.

Оголовок оформлен в виде верхней плиты с ребрами жесткости. Верхние швы 3 в тавровом соединении передают силу P с плиты на стойку аналогично швам 2.

7.4. Примеры конструкций стоек

Примерами стоек являются колонны промышленных зданий. Типовая колонна среднего ряда изображена на рис. 7.5.

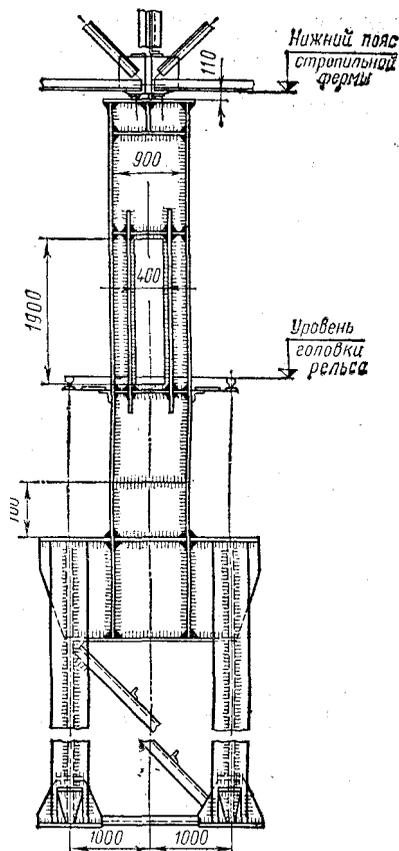


Рис. 7.5. Сварная колонна промышленного здания

При различных размерах поперечных сечений такие колонны применяются в зданиях с пролетами 24, 30 и 36 м. При разных нагрузках на кровлю и соответственно различных давлениях на фермы. Основной тип профиля колонны в верхней

части — сварной двутавр. В нижней части колонна состоит из двух двутавров, соединенных диагональными связями — гнутыми уголками мелких калибров и диафрагмами. Колонны поддерживают стропильные фермы и подкрановые балки, на которые устанавливаются рельсы.

В качестве стоек работают мачты электропередач, а также мачты, поддерживающие антенные устройства. Часто они представляют собой решетчатые конструкции, состоящие из вертикальных поясов, соединенных между собой связями. Негабаритные конструкции изготавливают на заводах в форме блоков. Последние транспортируют на место монтажа, где соединяют сварными швами или высокопрочными болтами.

Контрольные вопросы:

1. С какой целью стойки, составленные из нескольких ветвей, соединяют между собой связями?
2. Что такое приведенная гибкость стойки и как ее определяют в стойках со связями в виде планок?
3. Как рассчитывают сварные соединения на поперечную силу в стойках двутаврового и трубчатого профилей?
4. Что такое фиктивная поперечная сила при расчете на сжатие?
5. Как определяется фиктивная поперечная сила в стойках из углеродистой и низколегированной стали, а также из алюминиевых сплавов?

Лекция № 8

Сопряжении элементов

План:

- 8.1. Типы сопряжений
- 8.2. Расчет прочности по способу расчленения на составляющие
- 8.3. Расчет прочности по способу полярного момента инерции
- 8.4. Расчет прочности по способу осевого момента инерции

8.1. Типы сопряжений

Взаимные сопряжения элементов выполняют жесткими, частично жесткими и шарнирными. Абсолютно жестких и идеально шарнирных сопряжений не существует. Каждое

соединение является частично жестким. Однако в зависимости от степени приближения соединения к абсолютно жесткому или шарнирному их условно рассматривают как жесткие или шарнирные.

Отнесение к категории жесткого, частично жесткого или шарнирного соединения зависит от способа конструктивного оформления и от общей расчетной схемы конструкции. Поясним сказанное следующими примерами:

1. Балка большого пролета с малым моментом инерции поперечного сечения относительно горизонтальной оси крепится к двум коротким стойкам, обладающим большой жесткостью в плоскости изгиба (рис. 8.1, а). Элемент работает под нагрузкой P , как брус с защемленными концами.

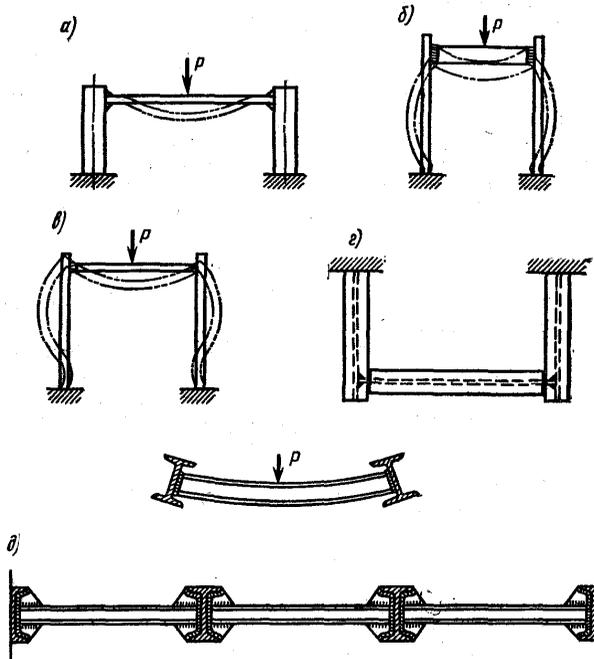


Рис. 8.1. Схема сопряжений балок:

а — балка жестко защемлена на опорах; б — балка имеет шарнирные опоры; в — жесткость соединения определяется усилиями в раме; г — закрепления балки приближаются к шарнирным; д — соединения на крайних опорах приближаются к шарнирным, на промежуточных — к жестким

2. Короткая и жесткая балка прикреплена к длинным стойкам, имеющим малые моменты инерции поперечных сечений в плоскости изгиба. При любой конструкции соединения брус работает как свободный, опертый по концам, так как шарнирность создается гибкостью стоек (рис. 8.1, б).

3. При различных соотношениях между жесткостями соединяемых элементов конструкция (рис. 8.1, в) работает под нагрузкой, как рама. Необходимо произвести ее статический расчет прочности. Изгибающие моменты и поперечные силы являются расчетными усилиями при проверке прочности соединения.

4. Балка (рис. 8.1, е), соединенная с двумя другими, имеет частично жесткие сопряжения. Величины изгибающего момента соединения зависят от соотношения между жесткостью при изгибе средней балки и жесткостью при кручении крайней. При жесткой средней балке и маложестких крайних изгибающий момент в соединении мал; при жестких крайних балках и гибкой средней он приобретает заметную величину.

5. Конструкция (рис. 8.1, д) представляет собой неразрезную многопролетную балку. На средних опорах образуются изгибающие моменты; сопряжения работают как жесткие. В крайних опорах изгибающие моменты отсутствуют, сопряжения работают как шарнирные.

Раньше, чем приступить к проектированию соединения элементов, необходимо произвести его статический расчет.

В тех случаях, когда можно сделать выбор между жесткими и шарнирными сопряжениями, следует иметь в виду следующие обстоятельства:

- шарнирные сопряжения проще в изготовлении; жесткие требуют наложения большого количества швов;

- жесткие сопряжения повышают жесткость всей конструкции, а также ее устойчивость; например, прогиб балки, свободно опертой на опоры, значительно больше, чем той же балки, у которой концы защемлены;

- жесткие сопряжения повышают степень статической неопределенности системы, что в ряде случаев оказывается целесообразным; например, в балке при шарнирных опорах и равномерной нагрузке расчетный изгибающий момент

$M = ql^2 / 8$; в балке с защемленными концами при том же нагружении — $M = ql^2 / 12$.

В сварных конструкциях наиболее часто применяют сопряжения жесткого типа. Расчетным усилием для них, как правило, является изгибающий момент. Если момент не может быть определен на основе статического расчета, то сопряжение целесообразно конструировать равнопрочным основным сечением изгибаемых элементов. При этом расчетный момент

$$M = [\sigma]_p W, \quad (8.1)$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения, прикрепляемого элемента; $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение.

Условие прочности сопряжения записывается на основе методов сопротивления материалов следующим образом: сумма моментов внутренних сил в элементах, составляющих сопряжение, равна или больше расчетного момента M .

Простейший тип соединения элементов, работающих на изгиб, показан на рис. 8.2, а.

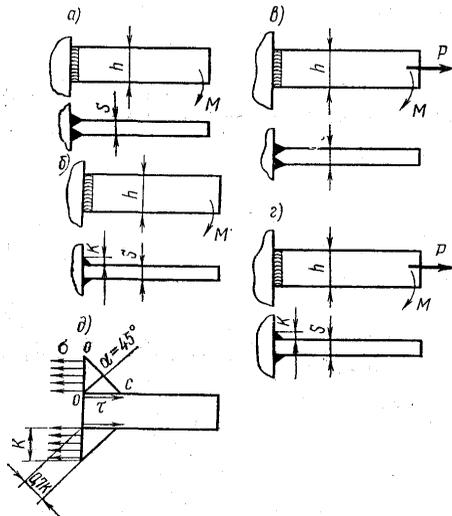


Рис. 8.2. Простейшие типы соединений:

а — с подготовкой кромок при M ; б — то же, при M и N ; в — с угловыми швами при M ; е — то же, при M и N ; д — схема работы углового шва

Если шов сварен с подготовкой кромок, то его поперечные сечения не отличаются от поперечного сечения полосы. Поэтому расчетные напряжения в шве определяют по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq [\sigma]_p, \quad (8.2)$$

где $W = \frac{sh^2}{6}$; s — толщина полосы; h — ее высота.

При наличии в том же соединении момента M и продольной силы N=P (рис. 8.2, б) условие прочности определяют по формуле

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} \leq [\sigma]_p. \quad (8.3)$$

Рассмотрим условия прочности прикрепления полосы, приваренной угловыми швами и работающей на момент (рис. 8.2, в).

В местах прикрепления напряжение от изгибающего момента

$$\frac{M}{W_c} < [\tau'] \quad (8.4)$$

В плоскости 0—0 (рис. 8.2, г) момент сопротивления двух сварных швов высотой h и катетом K

$$W_c = 2\beta K \frac{h^2}{6}. \quad (8.5)$$

Расчет прочности швов следует производить по напряжениям на кривой плоскости. Величину этих напряжений ограничивают допускаемыми напряжениями на срез $[\tau]$. Таким образом, расчетное напряжение в швах (рис. 8.2, в) от момента определяют по формуле

$$\tau = \frac{M}{2\beta K \frac{h^2}{6}} \leq [\tau']. \quad (8.6)$$

При действии в этом соединении момента M и продольной силы N=P расчетное касательное напряжение в угловых швах (рис. 8.2, г)

$$\tau = \frac{M}{W_c} + \frac{N}{A_c} \leq [\tau'], \quad (8.7)$$

где $[\tau']$ - допускаемое напряжение в шве при срезе; A_c — площадь сопротивления угловых швов.

8.2. Расчет прочности по способу расчленения на составляющие

Принимаем, что момент M уравнивается моментом пары сил в горизонтальных швах M_r и моментом закрепления вертикального шва M_B (рис. 8.3), т. е.

$$M = M_r + M_B. \quad (8.8)$$

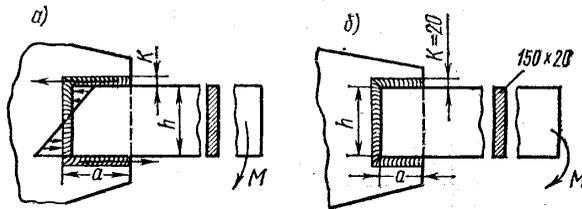


Рис. 8.3. Схема расчета по принципу расчленения на составляющие сварных соединений, работающих на изгиб и лежащих в плоскости M :

Допустим, что швы сварены в форме равнобедренного треугольника. В горизонтальных швах образуется пара сил. Ее момент

$$M_r = \tau \beta K a (h + K). \quad (8.9)$$

Момент в вертикальном шве вычисляется по формуле

$$M_B = \frac{\tau \beta K h^2}{6}; \quad (8.10)$$

поэтому

$$M = \tau \beta K a (h + K) + \frac{\tau \beta K h^2}{6}, \quad (8.11)$$

откуда касательное напряжение

$$\tau = \frac{M}{\beta K a (h + K) + \frac{\beta K h^2}{6}}. \quad (8.12)$$

Пользуясь уравнением (8.12) при конструировании соединения, легко определить требуемую длину швов a или их катет K .

8.3. Расчет прочности по способу полярного момента инерции

В ряде случаев, в особенности, когда соединения имеют сложную форму, как, например, на рис. 8.4, а, и расчленение их на составляющие затруднено, расчет прочности целесообразно производить по способу полярного момента инерции.

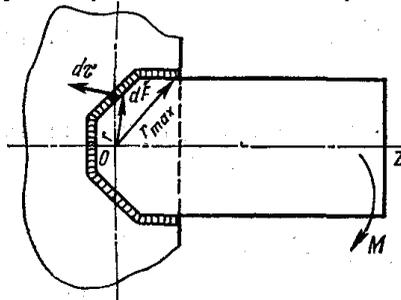


Рис. 8.4. Схема расчета сварного соединения по способу полярного момента инерции:

Примем в качестве рабочей гипотезы, что под действием момента соединение стремится повернуться относительно своего центра тяжести O . В элементе dF шва образуется реактивная сила

$$d\Gamma = \tau dF r. \quad (8.13)$$

Момент реактивного усилия для всего соединения относительно точки O

$$M = \int \tau dF r. \quad (8.14)$$

Так как величина перемещения точек шва пропорциональна расстояниям r до центра вращения, то и напряжения τ определяются как линейные функции от r .

Из соотношения

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{r}{1} \quad (8.15)$$

находим

$$\tau = \tau_1 r, \quad (8.16)$$

где τ_1 — напряжение на условном расстоянии от центра, равном единице. Так как τ_1 есть величина, не зависящая от r , то она может быть вынесена за знак интеграла:

$$M = \tau_1 \int_F r^2 dF \quad (8.17)$$

Интеграл представляет собой величину полярного момента инерции сварных швов относительно точки О:

$$\int_F r^2 dA = J_p. \quad (8.18)$$

Полярный момент инерции равен сумме двух осевых:

$$J_p = J_x + J_y. \quad (8.19)$$

Находим напряжение

$$\tau_1 = \frac{M}{J_p}; \quad (8.20)$$

наибольшее напряжение

$$\tau_{\max} = \frac{M}{J_p} r_{\max}. \quad (8.21)$$

8.4. Расчет прочности по способу осевого момента инерции

В основе этого способа лежит допущение, что напряжения в швах пропорциональны деформациям в основном металле (рис. 8.5) и, следовательно, возрастают в линейной зависимости от расстояния от точки до нейтральной оси элемента.

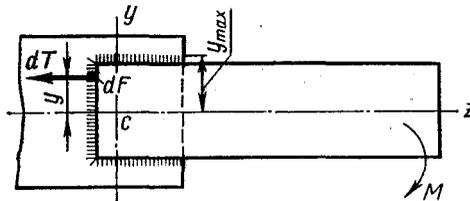


Рис. 8.5. К примеру расчета сварного соединения по способу осевого момента инерции

Реактивное усилие в элементе

$$d\Gamma = \tau dF. \quad (8.22)$$

Реактивный момент в элементе определяется по формуле

$$dM=d\Gamma y. \quad (8.23)$$

Полный момент внутренних сил, уравнивающий момент,

$$M = \int d\Gamma y = \int \tau dF y. \quad (8.24)$$

Принимаем, что напряжения представляют собой линейную функцию расстояния до оси. При этом

$$\frac{\tau}{\tau_1} = \frac{y}{1}, \quad (8.25)$$

где τ_1 — напряжение на расстоянии, равном единице, от оси z.

Тогда

$$M = \tau_1 \int_F y^2 dF. \quad (8.26)$$

Интеграл выражает величину момента инерции периметра швов относительно оси x.

Наибольшее напряжение

$$\tau_{\max} = \frac{M_y}{J_x} \leq [\tau^1]. \quad (8.27)$$

Расчет прочности по способу осевого момента инерции незначительно отличается от первого способа расчленения соединения на составляющие.

Наиболее часто все же применяют первый способ, в особенности при конструировании соединений с учетом заданных усилий. Второй способ используют для определения расчетных напряжений в заданных конструкциях соединений. Третий способ подобен первому. Его используют в тех случаях, когда расчленение соединений затруднительно.

Контрольные вопросы:

1. Какие соединения условно называют жесткими и какие шарнирными?
2. В чем преимущество жестких и шарнирных сопряжений?
3. Как определяют напряжения от изгиба в месте прикрепления элемента, если тавровое соединение выполнено с подготовкой кромок?

4. Как производят расчет на прочность такого соединения при действии изгибающего момента и продольной силы?

5. В чем заключается сущность расчета прочности соединения на момент, лежащий в плоскости соединения, способом расчленения на составляющие?

8. Как определяют результирующие напряжения от M и Q , по способу полярного момента инерции?

9. Как определяют результирующие напряжения от M и Q , по способу осевого момента инерции?

10. Какой из двух способов наиболее удобен при подборе требуемых размеров швов соединения, работающего на изгиб?

Лекция № 9 Сопряжении элементов

План:

9.1. Сопряжения балок различных профилей

9.2. Сопряжения балок между собой с дополнительными усилениями

9.3. Сопряжения балок со стойками

9.4. Точечные соединения, работающие на изгиб

9.1. Сопряжения балок различных профилей

При дальнейшем рассмотрении прочности сопряжений, работающих на изгиб, будем предполагать, что угловые швы имеют форму равнобедренного треугольника. При этом расчет прочности шва при ручной сварке производится всегда на срез по плоскости, совпадающей с биссектрисой прямого угла и равной βKa (K — катет шва, a — его длина).

Определим напряжения в сварном сечении, прикрепляющем балку прямоугольного поперечного сечения, работающую на изгиб (рис. 9.1, а).

Соединение сконструировано с угловыми швами, обваривающими периметр. Такое соединение удобно при повороте конструкции и при наложении швов в нижнем и вертикальном положениях.

Нормальные напряжения в балке вызывают касательные напряжения τ в швах:

$$\tau = \frac{M}{W_c} \leq [\tau']. \quad (9.1)$$

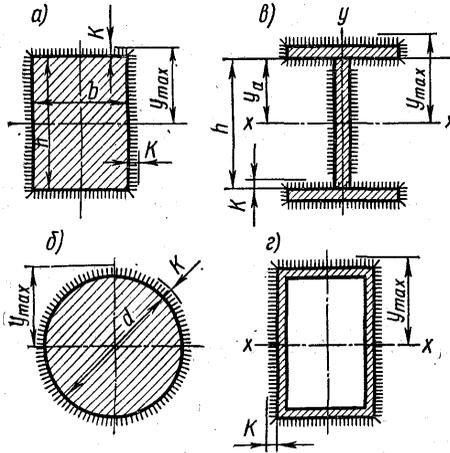


Рис. 9.1. Сварные соединения элементов, обваренных угловыми швами по периметрам

Момент сопротивления

$$W_c = \frac{J_c}{y_{\max}}, \quad (9.2)$$

где J_c — расчетный момент инерции периметра швов. Он определяется умножением момента инерции сечения швов на коэффициент $\beta = 0,7$ с учетом возможного разрушения швов по наименьшему сечению:

$$J_c = 0,7 \left[Kb \left(\frac{h+K}{2} \right)^2 \cdot 2 + \frac{K^2 b}{12} \cdot 2 + \frac{(h+2K)^2}{12} K \cdot 2 \right] \quad (9.3)$$

(h и K указаны на рис. 9.1, в).

Для круглого поперечного сечения (рис. 9.1, б):

$$J_c = 0,7 \left[\frac{\pi(d+2K)^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64} \right];$$

$$y_{\max} = \frac{d}{2} + K. \quad (9.4)$$

Если элемент работает при сложном сопротивлении — изгибающем моменте M и продольной силе N , то суммарное напряжение в соединении

$$\tau = \pm \frac{M}{J_c} y_{\max} + \frac{N}{A_c}, \quad (9.5)$$

где A_c — расчетная площадь швов, определяемая с учетом возможного разрушения по наименьшему сечению умножением площади поперечного сечения на β :

$$A_c = \beta KL, \quad (9.6)$$

где L — длина периметра швов.

Расчет прочности прикрепления произвольных профилей двутавровых, коробчатых (рис. 9.1, в, е) тавровых и т. п. при помощи швов производится так же, как в случаях, рассмотренных выше, на основе формулы

$$\tau = \frac{M}{J_c} y_{\max} \leq [\tau'], \quad (9.7)$$

где J_c — расчетный момент инерции периметра швов, который определяют умножением величины момента инерции сечения контура шириной K на β .

Если элементы нагружены поперечными нагрузками, то в них возникают изгибающие моменты M и поперечные силы Q . Напряжения в сварных швах от Q определяют при следующих допущениях:

- поперечная сила воспринимается только вертикальными швами;
- распределение напряжений по длине вертикальных швов равномерно.

Таким образом, среднее напряжение в шве от поперечной силы

$$\tau_0 = \frac{Q}{A_B}, \quad (9.8)$$

где A_B — расчетная площадь вертикальных швов.

На уровне верхней кромки вертикального листа в швах следует проверить результирующие напряжения от M и Q .

Напряжение от момента

$$\tau = \frac{M}{J_c} y_0, \quad (9.9)$$

где y_0 — расстояние от оси, проходящей через центр тяжести сечения, до горизонтальной верхней кромки (рис. 9.1, в).

В частном случае $y_0 = h/2$

$$\tau_0 = \frac{Q}{2\beta Kh}. \quad (9.10)$$

Результирующее напряжение

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau^2 + \tau_Q^2} \leq [\tau']. \quad (9.11)$$

Практика расчетов показывает, что проверка прочности по формуле (9.7) является решающей.

9.2. Сопряжения балок между собой с дополнительными усилениями

Конструкции сопряжений двутавровых балок показаны на рис. 9.2. Иногда балки небольшой высоты прикрепляют к высокой путем обваривания периметра поперечного сечения угловыми швами. В этом случае рационально усилить сопряжение балок косынками трапецеидального очертания, как указано на рис. 9.2, а. Толщины косынок и вертикальной стенки, как правило, равны. Остальные размеры устанавливаются с учетом требований жесткости сопряжения и прочности швов прикрепления. Подобная конструкция может быть рекомендована при статических нагрузках.

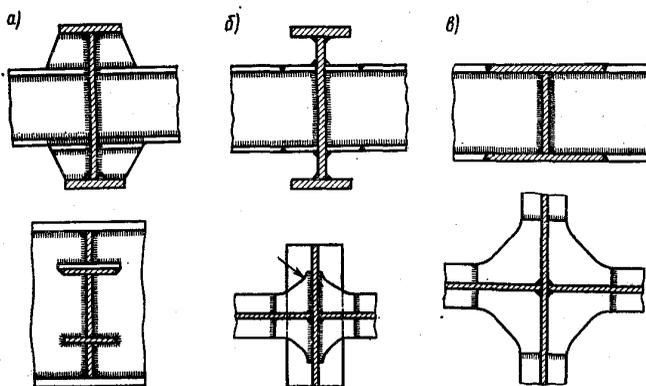


Рис. 9.2. Сопряжения сварных балок между собой:
а — высота балок разная, косынки вертикальные; б — то же, косынки горизонтальные; в — высота балок одинаковая

На рис. 9.2, а предусмотрена опора в виде столика. Подобного рода опоры очень облегчают монтаж балок.

Основную долю момента воспринимают швы, обваривающие поперечное сечение по периметру:

$$M_{II} = \frac{\tau J_c}{y_{\max}}, \quad (9.12)$$

где M_{II} — момент инерции периметра шва с учетом его ширины, равной β ; y_{\max} — расстояние от оси прикрепляемой балки до крайнего волокна шва.

Косынки повышают дополнительно прочность и надежность соединения.

Для сварного сопряжения балок, воспринимающих переменные нагрузки, более рационален тип конструкции, приведенный на рис. 9.2, б. Увеличением длины шва можно значительно повысить несущую способность конструкции, а устройством выкружек с радиусом r достигнуть снижения концентраторов напряжений. Стыковые соединения в ответственных конструкциях необходимо механически обрабатывать.

Для сопряжений балок одинаковой высоты, воспринимающих статические и переменные нагрузки, может быть рекомендована конфигурация (рис. 9.2, в), которая обеспечивает жесткость, устраняет концентраторы напряжений и позволяет накладывать швы в требуемом количестве.

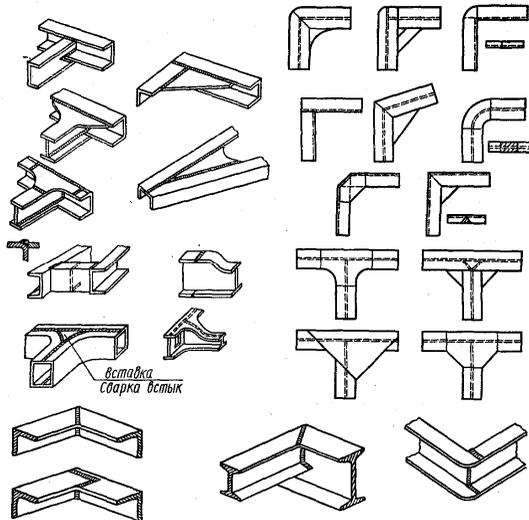


Рис. 9.3. Сопряжения балок различного профиля

На рис. 9.3 показаны примеры сопряжений швеллеров, двутавров и уголков. Узлы сконструированы с применением фигурной резки. Во всех случаях при работе балки на изгиб соблюдается следующее условие прочности: момент внутренних сил относительно центра тяжести сопряжения равен расчетному моменту.

9.3. Сопряжения балок со стойками

На рис. 9.4 приведено сварное сопряжение балки со стойкой. Это сопряжение выполнено обвариванием периметра поперечного сечения балки и установкой уголка и является типовым.

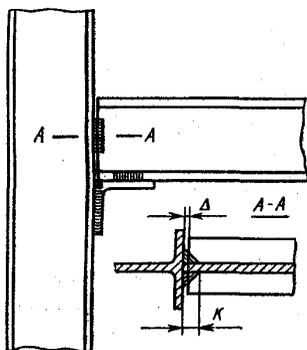


Рис. 9.4. Сопряжения шарнирного типа балки со стойкой в металлическом каркасе здания

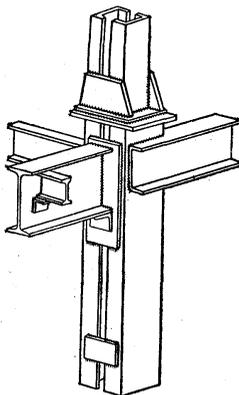


Рис. 9.5. Жесткие сопряжения балок со стойкой, применяемых в промышленном здании

На рис. 9.5 приведен пример сопряжения балки двутаврового профиля со стойкой при помощи коротких вертикальных швов. Между полками балки и стойки оставлены небольшие зазоры $\Delta = 1 \dots 2$ мм, которые обеспечивают шарнирность соединения. При этом волокна, наиболее удаленные от нейтральной оси, могут свободно деформироваться. Расчет прочности такого вида сопряжений производится на поперечную силу.

Пример сварного кронштейна приведен на рис. 9.6.

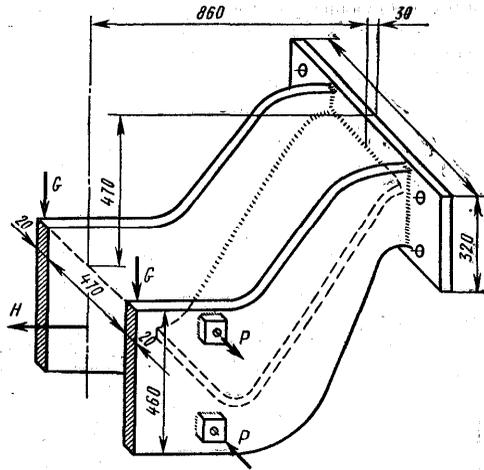


Рис. 9.6. Пример кронштейна.

9.4. Точечные соединения, работающие на изгиб

Пример точечного соединения, работающего на момент M , приведен на рис. 9.7, а.

Изгибающий момент уравнивается парой сил Γ , возникающих в точках.

Усилие в каждой точке

$$\Gamma = \frac{M}{h}. \quad (9.13)$$

Напряжение в точке

$$\tau = \frac{4M}{h\pi d^2} \leq [\tau'], \quad (9.14)$$

где h — расстояние между центрами точек; d — диаметр точки.

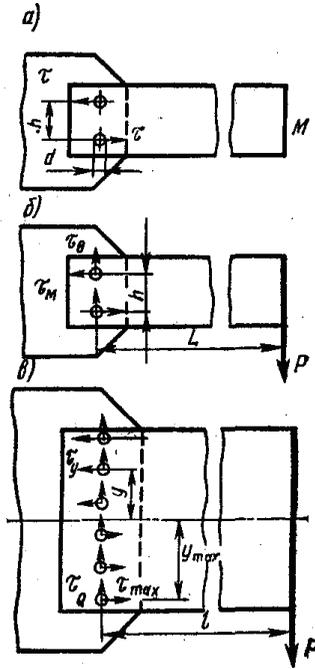


Рис. 9.7. Точечные соединения, работающие на M и Q

Пример точечного соединения, работающего на поперечный изгиб, приведен на рис. 9.7, б, в.

В соединениях возникают: изгибающий момент $M=Pl$; поперечная сила $Q=P$.

Напряжение в точке, наиболее удаленной от нейтральной оси, определяется по формуле

$$\tau_{max} = \frac{4M}{\pi d^2 \sum y^2} y_{max} \cdot \quad (9.15)$$

Напряжение, вызванное поперечной силой,

$$\tau_Q = \frac{4Q}{n\pi d^2}, \quad (9.16)$$

где n — количество точек в вертикальном ряду.

При наличии i -го количества вертикальных рядов точек от изгиба будет

$$\tau_{\max} = \frac{4M}{i\pi d^2 \sum y^2} y_{\max}, \quad (9.17)$$

а напряжение от Q

$$\tau_Q = \frac{4Q}{i\pi d^2}. \quad (9.18)$$

Результирующее напряжение должно быть

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_{\max}^2 + \tau_Q^2} \leq [\tau']. \quad (9.19)$$

Контрольные вопросы:

1. Как оформляют сопряжения балок разного профиля: двутавров с уголками, уголков с швеллерами и т. д.?
2. Как оформляют нежесткие сопряжения балок со стойками?
3. Как рассчитывают на прочность вертикальные швы в указанных сопряжениях?
4. Как оформляют жесткие сопряжения балок со стойками?
5. Как проверяют прочность жестких сопряжений на момент?
6. Как проверяют точечные соединения при работе на момент?

Лекция № 10 Сварные фермы

План:

- 10.1. Типы ферм
- 10.2. Определение нагрузок и усилия стержней
- 10.3. Поперечные сечения стержней
- 10.4. Узлы ферм
- 10.5. Специальные конструкции ферм

10.1. Типы ферм

Многочисленные эксперименты показали, что усилия в стержнях реальных ферм близки по значению к усилиям, вычисленным в предположении шарнирности узлов ферм. Обоснованное экспериментами допущение, что узлы ферм шарнирны, значительно облегчает проектанту задачу

конструирования и расчета. Проектирование фермы начинается с выбора рациональной ее системы. Система ферм зависит от назначения, общей компоновки конструкции, требований эксплуатации. Очень часто рациональная система определяется на основе опытного проектирования и сравнения нескольких вариантов. Из них выбирают ту конструкцию, которая отличается наименьшей массой и трудоемкостью при изготовлении.

Для стропильных ферм больших пролетов (рис. 10.1, а) желательны системы, имеющие стойки.

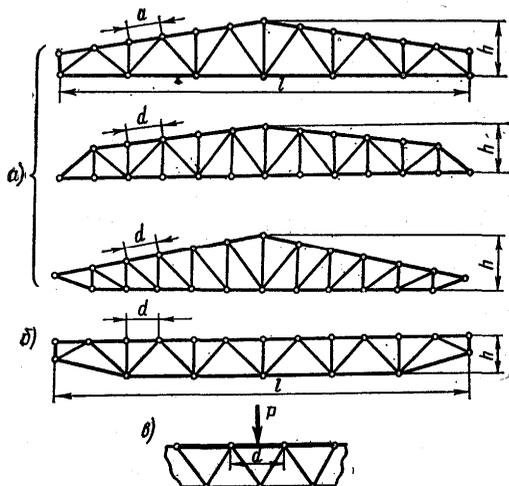


Рис. 10.1. Схемы ферм больших пролетов:

а - стропильные; б — крановые; в — схема загрузки панели пояса сосредоточенной силой

Длины панелей этих ферм составляют $d=1,5...3,0$ м, отношение высоты к пролету $h/l=1/10...1/14$. Пример крановой фермы приведен на рис. 10.1, б длина панели верхнего пояса, по которой перемещается тележка с грузом, принимается $d=1,5...2,5$ м; отношение высоты к пролету $h/l=1/12...1/18$ (это отношение определяется требованиями жесткости и компактности конструкции). Чем больше h/l , тем меньше прогибы ферм под нагрузкой, но зато больше должна быть и высота цеха. Исходя из указанных соображений, в настоящее время крановые конструкции, как правило, изготавливаются в

форме балочных систем, хотя раньше применение ферм для кранов было распространено в промышленности.

Панели мостовых ферм значительно больше, чем крановых в стропильных. Мостовые фермы должны обладать большой жесткостью, поэтому часто принимают отношение $h/l = 1/5 \dots 1/10$.

Приведенные системы ферм показаны в виде плоских систем. В действительности конструкции состоят всегда из двух или более ферм, связанных между собой элементами, называемыми связями.

10.2. Определение нагрузок и усилия стержней

В строительных и мостовых конструкциях в большинстве случаев нагрузки приложены в узлах ферм, т. е. в местах соединения стержней. Значения полезной нагрузки указываются в техническом задании на проектирование. Определение продольных сил в элементах ферм от нагрузок, приложенных в узлах, производится методами строительной механики. Целесообразно отдельно определять продольные силы от собственного веса, полезной нагрузки и суммарные расчетные силы.

Допустим, что нагрузки приложены не в узлах ферм, а по длине панели (рис. 10.1, в), тогда их следует разложить по узлам и обычным путем определять продольные силы в стержнях фермы. В нагруженных панелях помимо продольных сил действуют поперечные силы Q и изгибающие моменты M , которые определяются при рассмотрении нагруженного пояса фермы в качестве балки. Допустим, что панель (стержень пояса) нагружена сосредоточенной силой P , приложенной к ее середине. Учитывая, что пояс представляет собой неразрезанную балку, при расчете часто приближенно принимают расчетный момент:

$$M = \frac{Pd}{6}. \quad (10.1)$$

Расчетная поперечная сила

$$Q = \frac{P}{2}. \quad (10.2)$$

После вычисления продольных сил N и моментов M расчетное напряжение определяется по формуле

$$\sigma = \pm \frac{M}{J} y_{\max} + \frac{N}{A} \leq [\sigma]_p, \quad (10.3)$$

где J — момент инерции поперечного сечения пояса относительно горизонтальной оси; A — площадь сечения пояса; y_{\max} — расстояние от центра тяжести сечения до крайнего волокна, в котором напряжение имеет тот же знак, что и сила N .

В сжатом поясе производится проверка на продольный изгиб. После определения требуемых размеров поперечных сечений приближенным методом иногда производят вторичный расчет пояса с учетом изгибающего момента, вычисленного уточненным методом. При этом пояс рассматривается как многоопорная балка.

10.3. Поперечные сечения стержней

Стержни должны обладать достаточной прочностью и жесткостью. Превышение расчетного напряжения относительно допускаемого ни в коем случае не должно быть более 5%. Стержни следует конструировать по возможности экономично, т. е. расчетные напряжения должны быть близкими к допускаемым. Однако поперечные сечения стержней, нагруженных небольшими продольными силами, часто подбирают из условий жесткости. Поэтому в этих стержнях напряжения могут быть незначительными.

Наибольшее значение гибкости λ стержней стальных ферм промышленных сооружений, как правило, не должно превышать данных табл. 10.1.

Таблица 10.1

Предельная гибкость λ элементов ферм

Наименование элементов конструкций	Сжатые стержни	Растянутые стержни	
		при статических нагрузках	при динамических нагрузках
Пояса, опорные раскосы	120	400	150...250
Прочие элементы ферм	150	400	350
Основные колонны	120	-	-
Второстепенные колонны, связи между ними	150	300	300
Остальные элементы связей	200	400	400

В фермах гибкость ограничивается не только в сжатых, но и в растянутых стержнях, чтобы устранить их провисание при весьма большой гибкости и вибрации при динамических нагрузках. Сортамент применяемого металла должен быть по возможности однообразным, т. е. следует иметь как можно меньшее количество разнородных элементов (позиций). Это упрощает и удешевляет изготовление ферм на заводе. Фермы в значительном большинстве случаев конструируются из прокатных профильных элементов. Лучше применять гнутые элементы, имеющие меньшую толщину и повышенную жесткость по сравнению с прокатными.

При конструировании ферм следует стремиться сократить объем сварочных работ, располагать швы в элементах симметрично и обеспечивать удобное выполнение сварки как на заводе, так и на монтажной площадке.

Типы поперечных сечений сжатых поясов, имеющие наибольшее распространение, приведены на рис. 10.2.

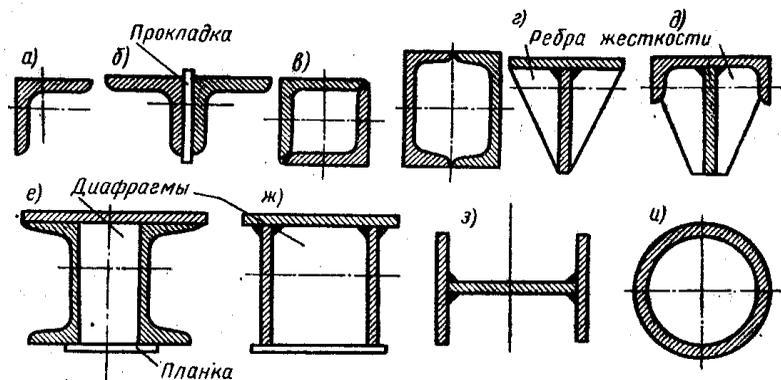


Рис. 10.2. Поперечные сечения сжатых поясов ферм

Сечения в форме уголков (рис. 10.2, а) применяют в слабонагруженных фермах или в нерабочих элементах. Сечения в форме двух уголков (рис. 10.2, б) часто проектируют в фермах с небольшими усилиями (в легких стропильных фермах, мачтах). Замкнутые сечения (рис. 12.2, в) целесообразны в тонкостенных конструкциях и в конструкциях, где требуется повышенное сопротивление кручению. Сечения, показанные на рис. 10.2, г, д, встречаются в крановых фермах, в которых верхние пояса помимо силы сжатия испытывают изгибающие моменты.

Двустенчатые конструкции (рис. 10.2, е, ж) применяют при средних и больших усилиях (в стропильных и крановых фермах). Конструкцию, представленную на рис. 10.2, з, применяют в мостовых пролетных строениях. Трубчатая конструкция (рис. 10.2, и) рациональна в отношении требований прочности и экономичности.

Требуемая площадь сжатого элемента пояса при отсутствии момента определяется из условия

$$A_{TP} = \frac{N}{[\sigma]_p \varphi}. \quad (10.4)$$

При подборе сечения следует предварительно задаться коэффициентом $\varphi = 0,5 \dots 0,7$. Свободную длину стержня выбирают в зависимости от конструкции сооружения. Например, горизонтальная жесткость стропильных ферм обеспечивается постановкой горизонтальных связей. Свободную длину пояса принимают равной расстоянию между центрами узлов. Подбор сечения сжатого пояса производят так же, как и сжатой стойки.

В стержнях, сечения которых приведены на рис. 10.2, соединительные швы конструируют непрерывными. Их выполняют обычно автоматической сваркой под флюсом, при этом катет шва принимают равным $(0,4 \dots 0,6)$ толщины листа. Нередко $K = 4 \dots 5$ мм.

Для повышения устойчивости элементов применяют соединительные планки, диафрагмы, ребра жесткости, расположенные в плоскости, перпендикулярной оси элемента. В фермах с большими пролетами, рассчитанными на тяжелые нагрузки, например, в мостовых, поперечные сечения пояса иногда меняются от панели к панели, и площадь сечения подбирают отдельно для каждой панели. Так поступают, когда длина панелей, например, превышает $6 \dots 8$ м. В крановых фермах средней грузоподъемности, в стропильных и других типах ферм сечения поясов обычно неизменны по длине. Следует иметь в виду, что перемена сечения не должна значительно изменять положения центра тяжести, так как это вызывает образование эксцентриситета усилий. Последнее приводит к появлению добавочного изгибающего момента в узле. Это иногда вынуждает отказаться от изменения сечения и сохранять его одинаковым по всей длине фермы. Допустимый эксцентриситет зависит от наибольшей высоты соединяемых элементов, т. е. $e \geq 0,02h$.

Если e превышает указанный предел, то необходимо учесть дополнительные напряжения от изгибающего момента.

Конструирование поперечных сечений растянутых поясов значительно проще, чем сжатых, так как в этом случае допускаемое напряжение в металле не зависит от гибкости элементов. Требуемая площадь поперечного сечения при растяжении определяется по формуле

$$A_{TP} = \frac{N}{[\sigma]_p} \quad (10.5)$$

Типы поперечных сечений растянутых поясов приведены на рис. 10.3.

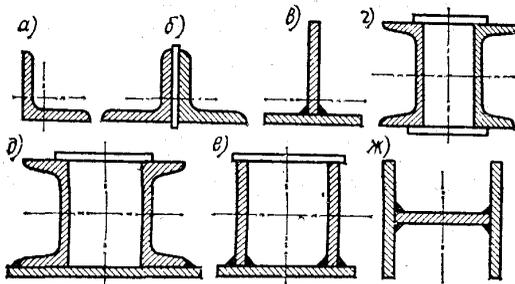


Рис. 10.3. Поперечные сечения растянутых поясов ферм

Тип сечения нижнего пояса обычно соответствует типу сечения верхнего пояса.

Соединительные швы стержней, изображенных на рис. 10.3, в...ж,— нерабочие, катеты швов $K=4...5$ мм, швы непрерывные.

Типы поперечных сечений раскосов и стоек приведены на рис. 10.4.

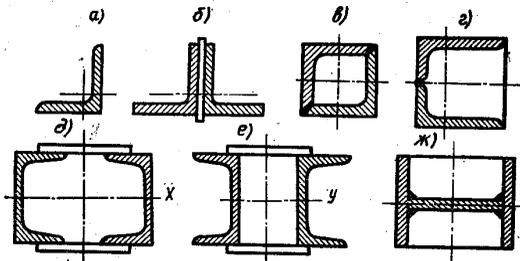


Рис. 10.4. Поперечные сечения сжатых и растянутых раскосов и стоек

Уголки (рис. 10.4, а) применяют тогда, когда элементы поясов сконструированы тоже из уголков. Парные уголки с зазором (рис. 10.4, б) применяют весьма часто в фермах, работающих под легкими и средними нагрузками. Сечения элементов, приведенные на рис. 10.4, в...ж, могут быть рекомендованы для стержней, если пояса имеют двустенчатые сечения. Целесообразно применение труб.

В растянутых раскосах и стойках требуемая площадь поперечного сечения элемента определяется по формуле (10.5), а в сжатых раскосах и стойках — по формуле (10.4) (предварительно принимают $\varphi=0,4\dots0,7$).

При определении гибкости раскосов и стоек в плоскости, перпендикулярной ферме, свободную длину l принимают равной теоретической, т. е. расстоянию между центрами узлов. При вычислении гибкости этих элементов в плоскости фермы допускается принимать расчетную длину, равную 0,8 от теоретической длины раскосов и стоек; это объясняется наличием частичного защемления элементов в узлах.

Если поперечное сечение элемента состоит из двух ветвей, как показано на рис. 10.4, д, е, то определяют гибкости: λ_x — относительно оси x ; λ_y — относительно оси y ; $\lambda_0 = \sqrt{y_y^2 + \lambda_1^2}$, где λ_1 — гибкость ветви, которую для сжатых элементов берут не больше 40.

Для определения коэффициента φ берется наибольшая из найденных величин. Площадь сечения каждого раскоса и стойки подбирают независимо от других. Однако нередко, для того чтобы сохранить однообразие сортамента для ряда элементов решетки фермы (раскосы, стойки), площадь сечения принимают одинаковой.

Прочность соединительных швов в растянутых элементах не рассчитывается. По условиям технологии катет шва, как правило, назначается размером 4...5 мм, но не менее 0,3s. Расстояние между планками берут таким, чтобы гибкость ветви растянутого элемента $\lambda \leq 200$. Расчет прочности соединительных планок (рис. 10.4, д, е) в сжатых элементах производится так же, как планок на сжатых стойках.

10.4. Узлы ферм

Условия рационального конструирования узлов ферм следующие: геометрические оси соединяемых стержней должны пересекаться в одной точке — центре узла; должна быть обеспечена возможность наложения швов, прочно прикрепляющих раскосы и стойки к поясам в удобном для производства сварочных работ положении, не должно быть скученных швов.

Требуемая длина угловых швов, закрепляющих стержень в узле, вычисляется по формуле

$$L = \frac{N}{\beta K [\tau']}, \quad (10.6)$$

где N — продольное усилие в стержне; $[\tau']$ — допускаемое касательное напряжение сварного шва.

В узлах часто применяют косынки, имеющие форму надставок, вставок, прокладок, накладок.

Узлы без косынок наиболее просты при изготовлении. Их следует применять, если могут быть соблюдены все правила рационального конструирования узловых соединений.

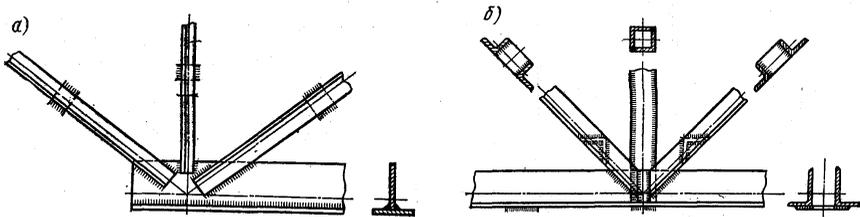


Рис. 10.5. Узлы без косынок:

а — сечение пояса одностенчатое; б — сечение пояса двустенчатое

Пример конструкции узла фермы без косынок с одностенчатым профилем пояса приведен на рис. 10.5, а. На рис. 10.5, б приведена конструкция, у которой нижний пояс и раскосы имеют двустенчатые сечения, что позволяет весьма компактно соединять элементы в узле.

Примеры конструкций узлов с надставками приведены на рис. 10.6, а, б. Соединения надставок — стыковые или тавровые. Расчет прочности швов, прикрепляющих раскосы к надставкам, производится обычным путем. Требуемая длина швов

прикрепления раскоса определяется по формуле (10.6). Приближенный расчет швов, прикрепляющих надставку к поясу, может быть получен с учетом следующих соображений. В узле сумма проекций сил на вертикальную ось $\sum Y = 0$. Следовательно, усилия в раскосах должны быть разных знаков. Допустим, что элемент N_1 растянут, а элемент N_2 сжат (рис. 10.6, а). Поскольку сумма проекций на горизонтальную ось $X=0$, приходим к выводу, что горизонтальные швы, прикрепляющие надставку, срезаются силой

$$\Gamma = N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2. \quad (10.7)$$

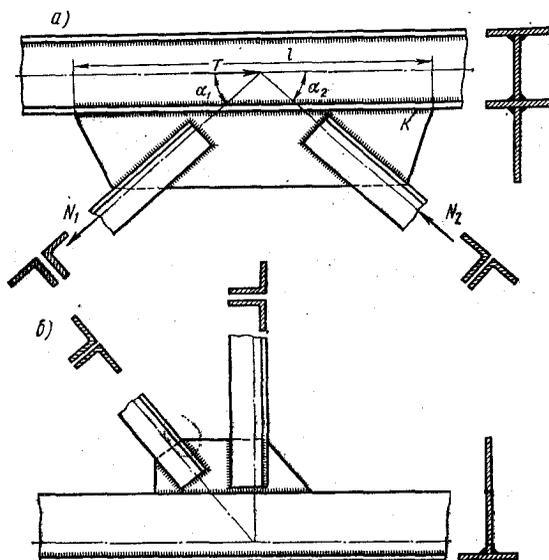


Рис. 10.6. Узлы фермы с надставками:
а — сечение пояса двутавровое; б — сечение пояса тавровое

Напряжение в шве

$$\tau = \frac{\Gamma}{\beta K l \cdot 2}, \quad (10.8)$$

где l — длина надставки.

Как правило, напряжения τ невелики. Пример узла со вставками показан на рис. 10.7.

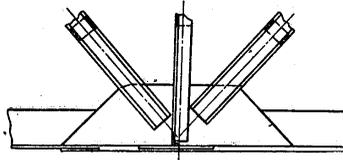


Рис. 10.7. Узел фермы со вставками

Вертикальные листы поясов обрабатываются и вместо них вставляются фигурные листы, размеры которых позволяют обеспечить прочное прикрепление раскосов и стоек. Вставку к вертикальному листу можно прикрепить как прямыми, так и косыми стыковыми швами. Узлы со вставками применяют в фермах, работающих под переменными нагрузками.

Узлы с прокладками применяют, когда сечения стержней ферм состоят из парных элементов — уголков, расставленных с зазором относительно друг друга (рис. 10.8, а). Прочность швов, приваривающих прокладку к поясам, определяется так же, как и прочность швов, прикрепляющих надставки.

Усилие, сдвигающее прокладку относительно пояса, определяется по формуле (10.7), где N_1 и N_2 — усилия в раскосах; α_1 и α_2 — углы наклона раскосов (рис. 10.8, в).

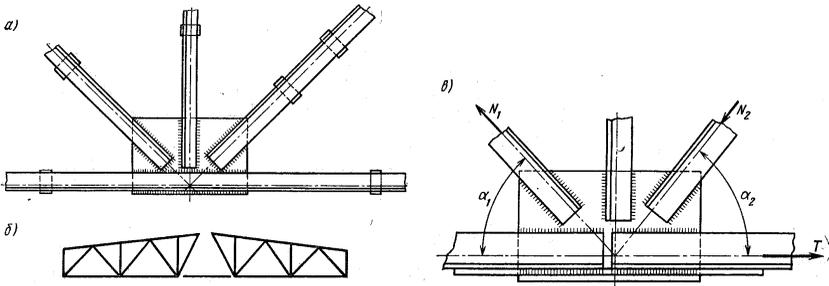


Рис. 10.8. Узлы с прокладками:

а — без разрыва пояса; б, в — с разрывом пояса

Пример узла с накладкой приведен на рис. 10.9. Узлы с накладками в настоящее время проектируют редко. В большинстве случаев они могут быть лишь в легких фермах.

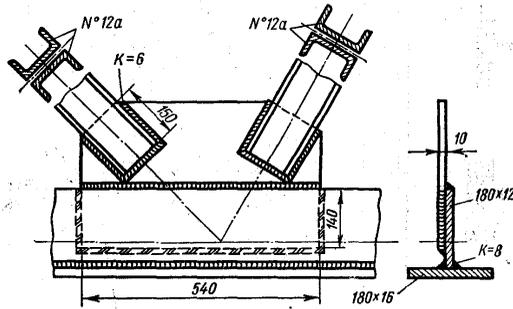


Рис. 10.9. Узел с накладкой

Конструкции опорных узлов зависят от назначения ферм и устройств креплений. При конструировании опорных узлов ферм необходимо соблюдать следующие условия: направление реакции A должно проходить через центр опорного узла; сжатый пояс должен проходить над опорой, не прерываясь; узел должен обладать достаточной жесткостью (рис. 10.10).

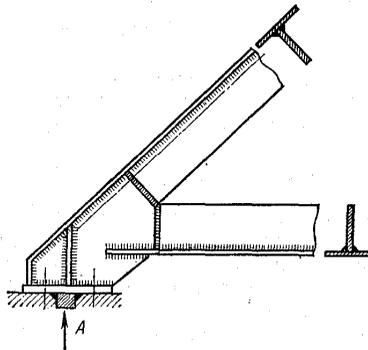


Рис. 10.10. Пример опорного узла стропильной фермы

10.5. Специальные конструкции ферм

На рис. 10.11 изображены различные узлы трубчатых стержней, применяемые в фермах. Узлы предназначены для легких ферм. В некоторых случаях допускаются небольшие эксцентриситеты. Для усиления узлов поставлены накладки, ребра жесткости. Оригинальна конструкция, где элементы прикрепляются к сфере, формирующей узел.

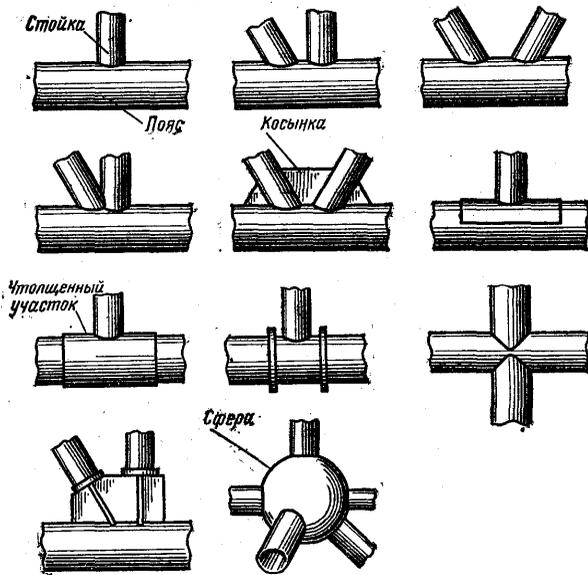


Рис. 10.11. Узлы трубчатых стержней разных типов

Другая группа узлов показана на рис. 10.12. В местах соединений некоторые трубы раскосов сплющиваются — это упрощает сборочно-сварочные операции.

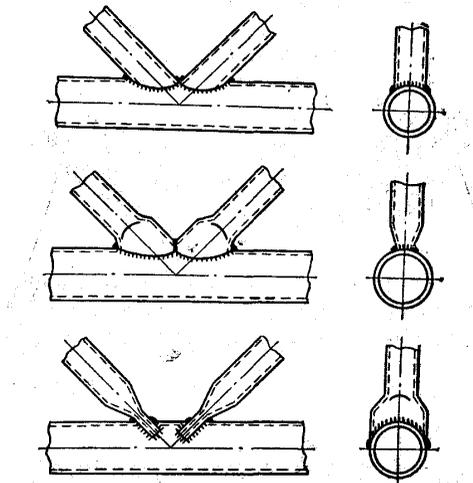


Рис. 10.12. Узлы трубчатых стержней со сплющиванием труб

На рис. 10.13 показана ферма, имеющая тонкостенные трубчатые поперечные сечения элементов из гнутых профилей. Для увеличения их жесткости предусмотрены гофры. Каждый стержень составлен из двух гнутых половин, соединенных между собой двумя продольными связующими швами. По длине элементы сварены стыковыми соединениями, а узлы — тавровыми.

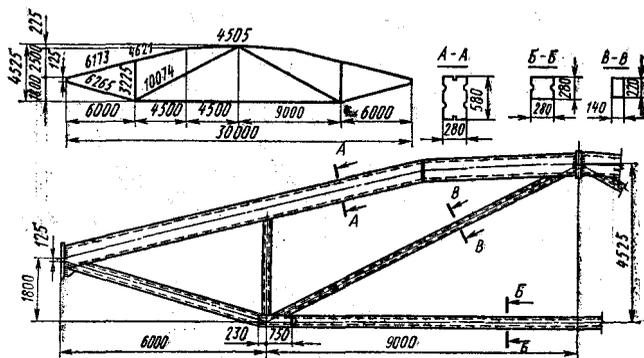


Рис. 10.13. Стропильная ферма из гнутых элементов

На рис. 10.14 приведен узел арматурной фермы из стержней периодического профиля. В узле соединения раскосов и стоек с поясом усилены косынкой.

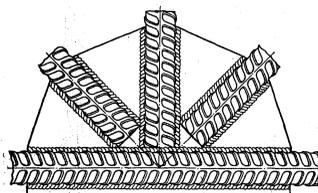


Рис. 10.14. Узел стержней арматуры периодического профиля

В строительной промышленности при изготовлении прогонов междуэтажных перекрытий, кровель и т. п. применяют легкие фермы из круглой стали, называемые прутковыми (рис. 10.15). В ней верхние и нижние пояса сконструированы из уголков легкого профиля, раскосы из прутков. Узлы сварены вручную дуговой сваркой. Фермы указанного типа обладают малым весом, не требуют большого объема сварочных работ и

экономичны, но могут быть рекомендованы лишь для работы под статическими нагрузками. В этих фермах целесообразно применение точечных соединений, которые обеспечивают хорошие свойства соединений круглого профиля с плоским.

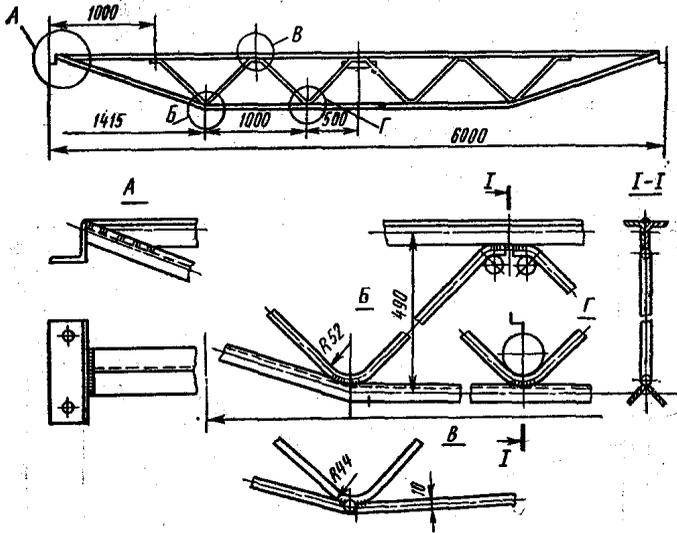


Рис. 10.15. Конструкция сварной легкой фермы с трубковыми раскосами

Контрольные вопросы:

1. Как определяют расчетные усилия в стержнях ферм?
2. Как определяют изгибающие моменты в поясах в случае загрузки панели сосредоточенными силами?
3. Какие общие требования предъявляются к жесткости стержней ферм?
4. Какие типы сечений рекомендуются для сжатых и растянутых поясов?
5. Какие типы сечений рекомендуются для сжатых и растянутых раскосов?
6. В чем преимущество и недостатки трубчатых поперечных сечений?
7. Как подбирают сечения сжатых стержней?
8. Как определяют расчетные напряжения в прикреплениях раскосов и стоек к поясам?

Лекция № 11

Сварные фермы

План:

- 11.1. Стыковые соединения поясов
- 11.2. Разновидности покрытий
- 11.3. Применение алюминиевых сплавов в сварных конструкциях ферм
- 11.4. Применение пайки
- 11.5. Применение предварительно напряженных элементов

11.1. Стыковые соединения поясов

Стыковые соединения поясов ферм подразделяют на три вида.

1. Технологические — их применяют, если отсутствуют элементы требуемой длины; эти соединения следует конструировать равнопрочными с целым элементом, так как положение их не всегда возможно определить заранее.

2. Конструктивные — их применяют для изменения поперечного сечения пояса от панели к панели; положение конструктивных стыковых соединений задано проектировщиком, поэтому расчет прочности можно производить по действующему расчетному усилию; их располагают в элементе на расстоянии, соответствующем 0,2...0,5 от длины панели.

3. Монтажные — их назначают в зависимости от условий транспорта и наличия подъемно-транспортных средств на строительстве. При монтаже элементы предварительно собирают на болтах или струбцинах; после этого производят сварку соединений. Положение монтажных стыковых соединений всегда назначает проектировщик.

Наиболее целесообразны стыковые соединения с прямыми и иногда косыми швами (рис. 11.1, а, б). Эти типы соединений могут быть рекомендованы не только для угловых и тавровых профилей, но и для Н -образных, П - образных и других разновидностей поперечных сечений. Указанные типы стыковых соединений применяют при работе элементов на растяжение и сжатие, в особенности при переменных нагрузках.

Для соединений поясов легких ферм в растянутых элементах можно допустить конструкции соединения, приведенные на рис. 11.1, в, а в сжатых — конструкции, приведенные на рис. 11.1, г.

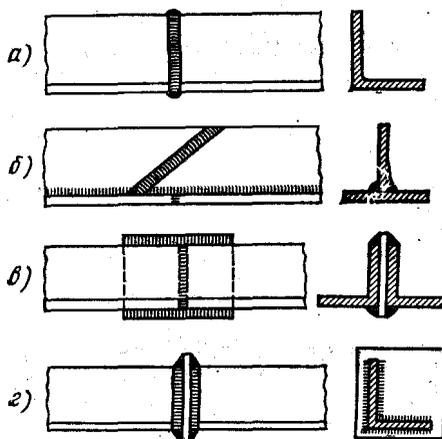


Рис. 11.1. Стыки поясов фермы

Расчет прочности стыков производится согласно общим правилам расчета сварных соединений.

Стыковые соединения, выполняемые в монтажных условиях, могут быть спроектированы с применением высокопрочных болтов.

11.2. Разновидности покрытий

Для покрытий применяют структурные конструкции, изготавливаемые из секториальных узлов, соединяемых в центре сваркой (нередко ванным методом) (рис. 11.2). Структурные конструкции выполняются также складчатыми. В пространственной статически определимой системе изымают стержень, после чего она обращается в механизм, может складываться, транспортироваться в таком состоянии на место установки, где вставляется недостающая связь и система снова обращается в ферму.

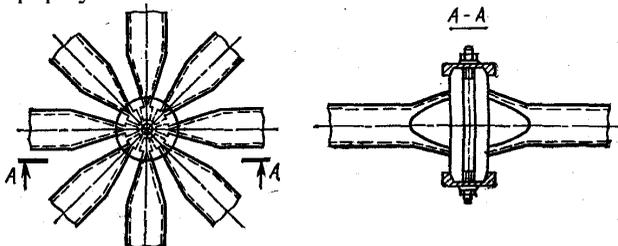


Рис. 11.2. Центральный узел купольного покрытия

Большое внимание уделяется строительству легких ферм из гнутых тонкостенных элементов, структурным куполам, перекрывающим служебные и производственные помещения. Тонкостенные элементы в легких конструкциях часто свариваются точечной сваркой, а элементы из профилей, имеющих периодический характер,— дуговой.

Сложной является сварка сетчатых конструкций (рис. 11.3), изготавливаемых из тонкостенных труб и других профилей. Соединения свариваются дуговой, контактной сваркой, а также паяются.

Сетчатые конструкции применяются: в висячих одностойных системах (а); в висячих системах с жестким поясом (е); в сплошных оболочковых системах (к...м) и др.

В указанных конструкциях применяют иногда композитные материалы, состоящие из алюминиевой матрицы и усилителей из стальной проволоки, соединяемые пайкой.

В тяжелых фермах иногда применяют композитные элементы, состоящие из стальных труб, заполненных бетоном. Подобные элементы наиболее целесообразны в арочных объектах. Они обладают хорошими показателями устойчивости.

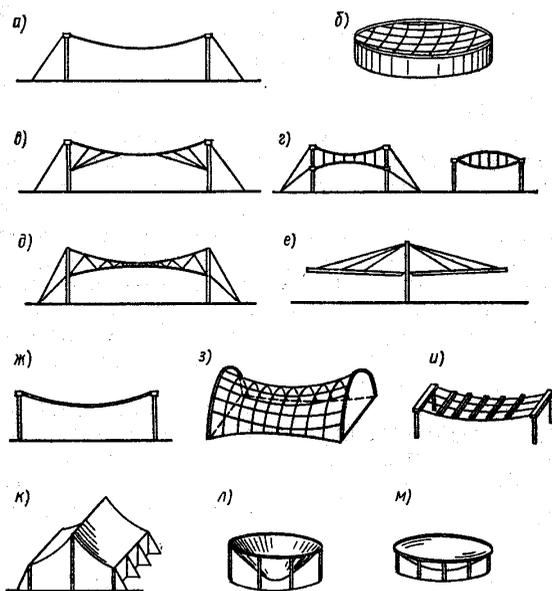


Рис. 11.3. Системы висячих покрытий

11.3. Применение алюминиевых сплавов в сварных конструкциях ферм

Алюминиевые сплавы могут быть рекомендованы для ферм, к которым предъявляются требования предельного сокращения веса, например, для стрел подъемных кранов, сборно-разборных мостов, гидротехнических затворов, а также для объектов, работающих в условиях агрессивных сред. Наибольшее применение для несущей конструкции имеют сплавы АВТ, В92Т, АД33Т1, АМг6, АМг61. Важным преимуществом сварных алюминиевых ферм является их хорошая сопротивляемость ударным нагрузкам при низких температурах. Недостатком алюминиевых ферм по сравнению со стальными являются повышенные значения прогибов и малое значение коэффициентов φ , чувствительность к концентраторам напряжений, затруднения при сварке некоторых сплавов, в частности высокопрочных.

При изготовлении ферм из алюминиевых сплавов применяют гнутые элементы, полученные прокаткой, прессованием, выдавливанием и другими способами. Как правило, конструкции ферм сваривают аргонодуговой сваркой, реже — контактной. Для обеспечения плотности соединений и улучшения антикоррозионных свойств иногда применяют склейку. Применение алюминия в конструкциях сборно-разборного типа позволяет уменьшить их массу по сравнению со стальными в 2,5 раза. Применение алюминиевых сплавов в строительных конструкциях достаточно широко: кровельные панели, потолки, подземные трубопроводы, радиобашни, силосные башни, декоративные объекты. Удельный вес алюминиевых материалов составляет 2,6...2,85 г/см³; модуль упругости $E=26000$ МПа.

Пределы текучести принимаются равными напряжению, вызывающему относительные остаточные удлинения

В исходном состоянии алюминиевые сплавы пластичны. Они упрочняются нагартовкой или термообработкой. Исключительно разнообразен сортамент прессованных алюминиевых профилей: тонкостенных широкополых двутавров и тавров, уголковых, трубчатых, П-образных.

При соприкосновении алюминия с воздухом на его поверхности моментально образуется пленка из Al_2O_3 , предохраняющая от последующей коррозии. Тем не менее,

некоторые алюминиевые прочные сплавы, например, В95Т, обладают невысоким сопротивлением коррозии и плакируются при обкладке листами чистого алюминия последующей прокаткой. Многие сплавы свариваются хорошо.

11.4. Применение пайки

Пайка строительных конструкций применяется редко, например, для оцинкованных конструкций, в которых сварка ограничивается санитарными требованиями. В этих случаях пайка успешно заменяет сварку.

До последнего времени соединения применялись главным образом в приборостроении и машиностроении. Однако пайка — это перспективный процесс и при изготовлении строительных конструкций, в частности мачтовых ферм для линии электропередач. При пайке используют соединения внахлестку. На рис. 11.4 изображены паяные узлы одной из мачтовых ферм.

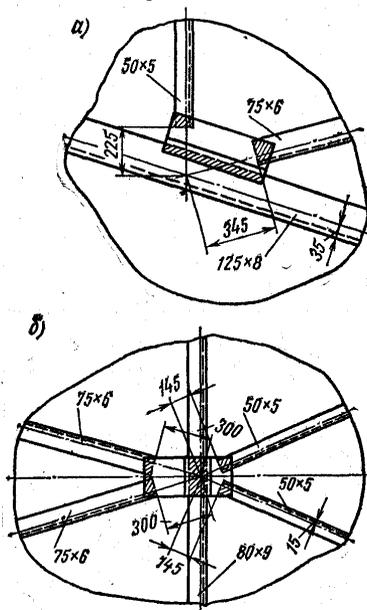


Рис. 11.4. Примеры паяных узлов мачтовой фермы

Сами швы показаны заштрихованными. Размеры площади спая легко изменить в зависимости от расчетных усилий соединений.

Расчет прочности паяных швов в соединениях производят по формуле

$$\tau = \frac{P}{A} \leq [\tau'], \quad (11.1)$$

где A — площадь паяного шва; $[\tau']$ — допускаемое напряжение паяного шва, зависящее от припоя и технологического процесса.

Проведенные исследования подтвердили достаточно удовлетворительную работу паяных соединений при статических и усталостных нагрузках.

11.5. Применение предварительно напряженных элементов

Предварительно напряженные элементы, работающие на продольные силы, могут применяться в поясах, раскосах, тяжелых фермах.

Сечение затяжек этих элементов проектируется симметричным относительно осей x и y в форме двух швеллеров, трубы и т. д. (рис. 11.5).

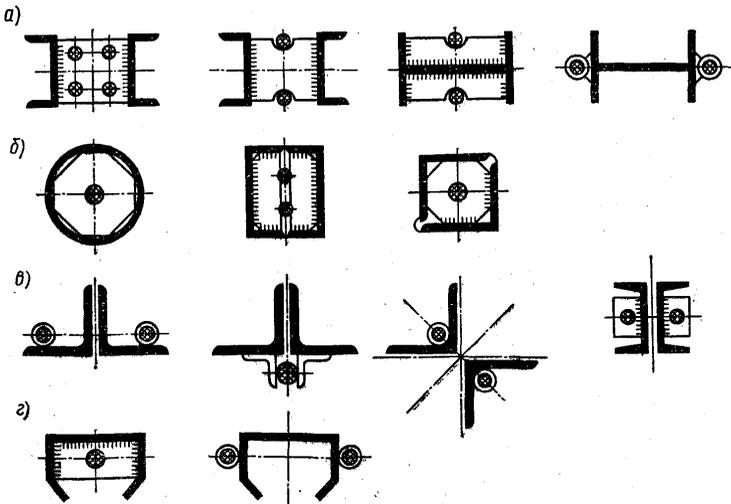


Рис. 11.5. Типы сечения стержней фермы с размещением затяжек

Иногда затяжки выполняются из стальных канатов, пучков и прядей высокопрочной проволоки. На рис. 11.5 изображено

крепление затяжки крупного поперечного сечения к конструкции.

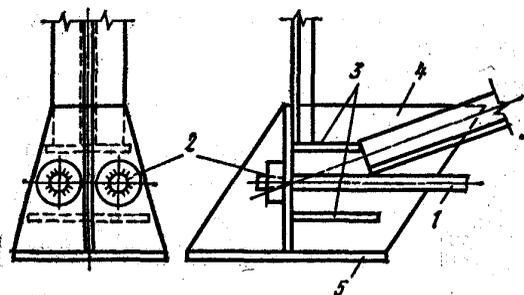


Рис. 11.6. Опорный узел фермы с анкерной затяжкой:

1 — затяжка; 2 — анкерная колодка; 3 — ребра жесткости; 4 — фасонка; 5 — опорная плита

Напряжение стержня диаметром d создает обжатие конструкции.

Затяжки выполняются из стальных канатов, концы которых заводятся в стаканы, расплетаются, заливаются баббитом, бетоном с добавлением стружки. Натягивание осуществляется домкратами.

Предварительное натяжение уменьшает металлоемкость основной конструкции. Ее эффективность растет с повышением напряжения в затяжке, которую следует выполнять из высокопрочного металла.

Пример узла с напряженными стержнями изображен на рис. 11.7.

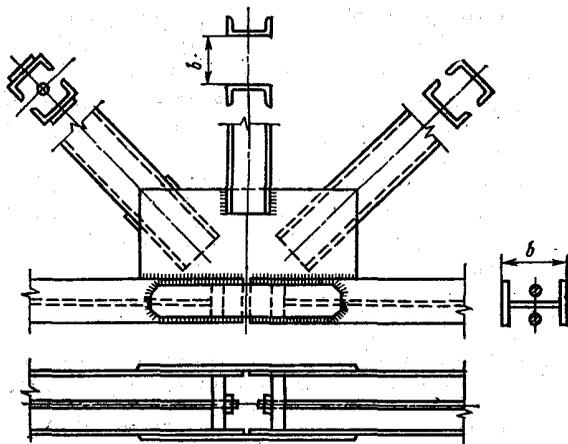


Рис. 11.7. Узел фермы с предварительно напряженными стержнями

В железнодорожных мостах применяют сталежелезобетонные конструкции. На рис. 12.26 показан пример такой конструкции. Она представляет собой железобетонную плиту, соединенную с металлической балкой. Цель создания подобного объекта — повысить несущую способность конструкции и иметь железобетонную прокладку, понижающую ударное воздействие.

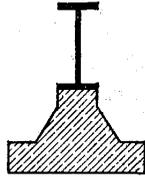


Рис. 11.8. Пример сталежелезобетонной конструкции

На рис. 11.9 показана ортотропная плита, устанавливаемая в качестве проезжей части на главной ферме моста. Плита состоит из ребер в форме полос, иногда с применением других профилей — швеллеров.



Рис. 11.9. Ортотропная плита

Контрольные вопросы:

1. В чем особенность конструирования ферм из алюминиевых сплавов по сравнению со стальными в отношении устойчивости сжатых элементов?
2. Какое назначение имеют стыки поясов ферм?
3. Какие конструкции стыков могут быть рекомендованы для элементов уголкового, Н-образного и трубчатого профилей при растяжении и сжатии?
4. Какие существуют пути для уменьшения веса ферм в отношении рационального выбора металла?
5. Что такое предварительно напряженные конструкции?
6. С какой целью применяют в фермах гнутые элементы?
7. Какие цели преследует типизация ферм?
8. Какие существуют типы облегченных ферм?

9. Целесообразно ли применение контактной сварки в фермах легкого типа?

Лекция № 12

Сварные листовые конструкции

План:

- 12.1. Виды листовых конструкций
- 12.2. Вертикальные цилиндрические резервуары с плоскими днищами
- 12.3. Цистерны
- 12.4. Газгольдеры и сферические резервуары
- 12.5. Применение специальных сплавов для изготовления резервуаров и цистерн

12.1. Виды листовых конструкций

Листовые оболочковые конструкции разделяют на две основные группы.

К первой группе относят резервуары и другие изделия, предназначенные для хранения невзрывоопасных и неядовитых жидкостей и газов при давлении $p \leq 0,05$ МПа и температуре $T \leq 100^\circ \text{C}$. Эти конструкции изготавливают согласно общим правилам проектирования и требованиям эксплуатации промышленных сооружений.

Ко второй группе относят котлы и сосуды, работающие под высоким давлением. Эксплуатация их находится под особым наблюдением инспекции котлонадзора. Эти конструкции проектируют и изготавливают согласно специальным техническим условиям.

12.2. Вертикальные цилиндрические резервуары с плоскими днищами

Основными элементами резервуара являются боковая стенка, покрытие и днище (рис. 12.1).

Днище этих конструкций в большинстве случаев плоское, корпус цилиндрический. Такая форма рациональная с точки зрения прочности и возможности изготовления ее с наименьшим расходом металла. Изготавливают резервуары главным образом из сталей марок Ст2 и Ст3, а также из низколегированных сталей.

Оптимальное с позиции расхода металла соотношение между высотой h резервуара и его диаметром D определяется условием, что масса металла в днище и покрытии равна массе металла в цилиндрической части. При этом для объектов

объемом $100...600 \text{ м}^3$ - $h/D=1,25...0,85$; для объектов объемом до 10000 м^3 - $h/D=0,7...0,35$. Однако с учетом требований технологии типовые проекты резервуаров вместимостью $100...2000 \text{ м}^3$ предусматривают изменение высоты стенки от 5920 до 11845 мм, тогда как в более крупных резервуарах ($50\ 000 \text{ м}^3$ и выше) высота остается практически постоянной и, как правило, не превышает 18 м.

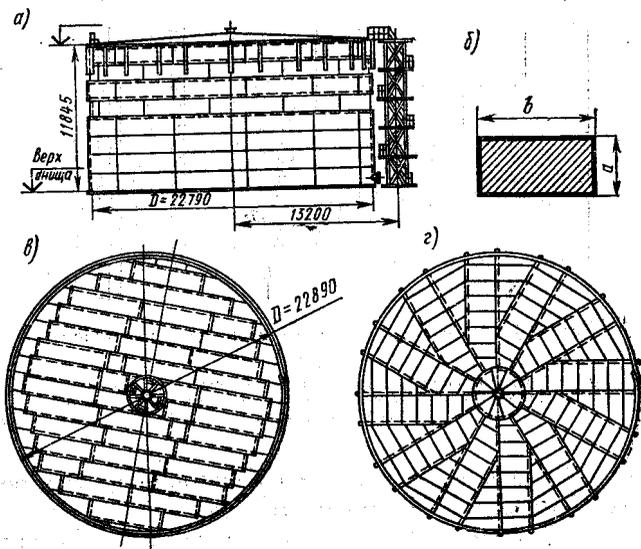


Рис. 12.1. Общий вид резервуара объемом 5000 м^3 :
 а — фасад; б — схема элемента кровли; в — план днища;
 г — план крыши

Схематическое расположение швов на цилиндрической части резервуара показано на рис. 12.2, а. Продольные стыковые швы в нижней части оболочки располагают в одну нитку или вразбежку (рис. 12.2, б, в).

На рис. 12.2, б показан продольный разрез нижней части оболочки соединения листов толщиной до $7...8 \text{ мм}$; на рис. 13.2, в изображены нахлесточные соединения. Размер нахлестки $a \geq 4s$, где s — толщина листа обечайки. Внешние швы нахлесточного соединения накладываются непрерывными, внутренние — прерывистыми. Последнее делается для улучшения условий контроля соединений на плотность. В местах

пересечений горизонтальных и вертикальных швов производят подбивку листов, обеспечивающих плотность соединений. Продольные швы свариваются встык (рис. 12.2, а).

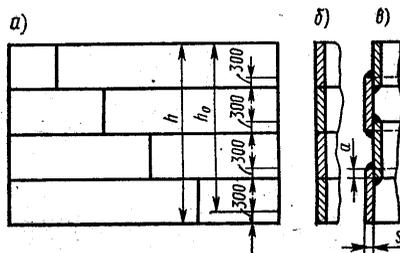


Рис. 12.2. Сварные соединения стенки резервуара:

а, б — расположение поясов при стыковых соединениях; в - ступенчатое расположение при нахлесточных соединениях поясов

Толщину обечаяек проектируют переменной и назначают согласно расчету на прочность. По безмоментной теории оболочка рассматривается как гибкая, учитывающая лишь мембранные напряжения. Основными рабочими соединениями являются продольные швы обечаяек. Их прочностью определяется толщина стенок резервуара.

Расчет оболочек производится как тонкостенных безмоментных систем по формулам Лапласа.

Игнорирование изгибающими моментами объясняется малой толщиной оболочек. При системах с толщиной в десятки миллиметров учитываются также изгибающие моменты и их влияние тем значительнее, чем меньше радиус обечайки.

Допустим, что давление в резервуаре на глубине y (рис. 12.3, а)

$$p = \gamma y, \quad (12.1)$$

где γ — удельный вес жидкости.

Определим напряжения в вырезанном из обечайки кольце шириной, равной единице. Рассечем кольцо плоскостью и приложим в месте разреза силы

$$N = \sigma \cdot s \cdot 1, \quad (12.2)$$

где σ — напряжение в кольце; s — толщина кольца.

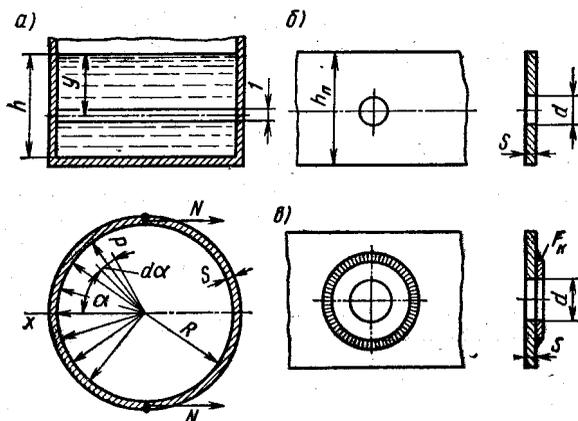


Рис. 12.3. К расчету цилиндрической части резервуара:
 а — определение напряжений цилиндрической части; б —
 отверстие в цилиндрической части; в — цилиндрическая часть
 в месте отверстия усилена кольцом

Условие статического равновесия полукольца

$$-2N + 2 \int_0^{\pi/2} pR \cos \alpha d\alpha = 0, \quad (12.3)$$

откуда

$$N = pR \int_0^{\pi/2} \cos \alpha d\alpha = pR. \quad (12.4)$$

Напряжение в кольце

$$\sigma = \frac{pR}{s}. \quad (12.5)$$

Напряжения действуют параллельно касательной к цилиндрической поверхности. Они возникают также и в продольном шве обечайки. Поэтому из условий прочности напряжение должно быть

$$\sigma \leq [\sigma']_p. \quad (12.6)$$

Требуемую толщину s_{TP} листа обечайки определяют по формуле

$$s_{TP} = \frac{pR}{[\sigma]_p}, \quad (12.7)$$

где p — давление, определяемое по формуле (12.1); R — радиус резервуара в сечениях на расстоянии 300 мм от нижней кромки пояса рассчитываемой обечайки (см. рис. 12.2, а), т. е. $u=h_0$. Чем меньше давление p , тем соответственно тоньше листы обечайки. По соображениям рационального конструирования наименьшую толщину обечайки в резервуарах принимают равной 4 мм. Кольцевые швы в резервуарах напряжены значительно меньше.

При проектировании резервуаров в настоящее время применяют метод расчета прочности по предельному состоянию. При этом допускаемое напряжение определяется по формуле

$$[\sigma]_p = R_p m / n. \quad (12.8)$$

В резервуарах из стали Ст3, сваренных электродами Э42, при использовании физических методов контроля швов расчетное сопротивление $R_p=210$ МПа, а при визуальном методе контроля $R_p=180$ МПа. Коэффициент условий работы $m=0,8$; $n=1,1$ — коэффициент надежности для гидравлического давления жидкости. Числовое значение $\sigma_p = 210 \cdot 0,8 \cdot 1,1 = 153$ МПа.

В нахлесточных соединениях распределение напряжений неравномерно. В участках двойной толщины растягивающие напряжения, направленные по касательной к окружности, уменьшаются по сравнению с растягивающими напряжениями на участках вне нахлестки. Соответственно сокращаются значения кольцевых деформаций. Корпус в этих зонах имеет меньший диаметр, нежели между нахлесточными, поэтому элементы, направленные по образующей, испытывают изгиб.

Если в поясе предусмотрено отверстие для крепления труб (рис. 12.3, б), то обечайка в зоне отверстия ослабляется и в этом случае возможны два варианта расчета.

1. Допустим, что напряжение в сечении, ослабленном отверстием,

$$\sigma = \frac{pRh_{II}}{[(h_{II} - d)s]} \leq [\sigma]_p, \quad (12.9)$$

где h_{II} — высота пояса; d — диаметр отверстия. В этом случае отверстие не опасно, так как запас прочности в целом сечении настолько велик, что даже в месте выреза расчетное напряжение σ оказывается меньше допустимого.

2. Предположим, что напряжение в сечении, ослабленном отверстием, больше допускаемого $[\sigma]_p$. В этом случае обечайку в зоне выреза обычно усиливают (рис. 12.3, в), например, кольцом. Условно считают, что кольцо возмещает площадь металла, вырезанного из стенки.

Плоское днище резервуара (рис. 12.1, в), установленное на песчаное или бетонное основание, не несет рабочих усилий. Днище изготавливают из листов толщиной 4..8 мм в зависимости от диаметра резервуара. Нередко по периферии днища под вертикальными стенками укладывают более толстые листы. Например, если в средней части $s=6$ мм, то на периферии $s=8$ мм.

Соединение цилиндрической части с днищем является ответственным элементом конструкции (рис. 12.4, а).

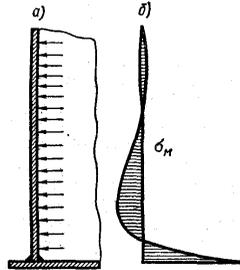


Рис. 12.4. Соединение цилиндра с днищем: а — вид соединения; б—эпюра напряжения от изгиба

В месте соединения возникает изгибающий момент M , зависящий от толщины вертикальной стенки и днища, коэффициента жесткости основания и от длины участка листа днища (консоли), выступающего за стенку.

Приближенно момент, возникающий в месте соединения на единицу длины, определяется по формуле

$$M_1 = 0,1pRs. \quad (12.10)$$

Напряжения в стенке резервуара

$$\sigma = \frac{M_1}{W} = \frac{0,1pRs}{1 \cdot \frac{s^2}{6}} = 0,6 \frac{pR}{s}. \quad (12.11)$$

Напряжение направлено параллельно образующей. Эпюра распределения напряжений от момента по высоте стенки

резервуара показана на рис. 12.4, б. Установлено, что соединение цилиндрической части с днищем двумя непрерывными швами обеспечивает прочность, поэтому обычно специального расчета на прочность для этого соединения не производят.

Крыши резервуаров (см. рис. 12.1, б) проектируют при условии выполнения основного объема заготовительных и сварочных работ на заводе. При наличии средней стойки покрытие расчлняют на отдельные щиты. Щит состоит из двух элементов, направленных радиально, нескольких поперечин и листов покрытия, привариваемых к ним. Радиальные и поперечные элементы, образующие каркас щита, изготовляют из профильных прокатных, гнутых или штампованных заготовок. Щит, с одной стороны, приваривают к оболочке, а с другой — опирают на центральную стойку.

Стальные листы кровли имеют толщину $s=2...3$ мм. Элементы каркаса воспринимают вертикальную нагрузку от собственного веса, веса снега, учитываемого в зависимости от района и угла наклона кровли, а также веса людей, которые могут находиться на кровле. Листовые покрытия рассматриваются при расчете прочности как пластины с опорой по контуру. Приблизненно пластина при расчете может приниматься прямоугольной (см. рис. 12.1, г). Обозначим через a меньшую сторону прямоугольника, через b — большую. Напряжения в пластине от нагрузок q , равномерно распределенных по ее плоскости,

$$\sigma = 6\alpha q a^2 / s^2 \quad (12.12)$$

где q — нагрузка от веса снега и собственного веса кровли; $\alpha = 0,192$ при $a=b$, $\alpha = 407$ при $a=0,5s$, s — толщина кровли.

Вес человека P может рассматриваться в качестве эквивалентной распределенной нагрузки

$$q_0 = 2P / ab \quad (12.13)$$

Каркас расчлняют на отдельные стержни, которые рассматривают при расчете на прочность как балки со свободной опорой, работающие на поперечный изгиб под действием вертикальных сил.

Если в конструкции резервуара предусмотрена средняя стойка, то она воспринимает около 33% всей вертикальной нагрузки на крышу. Она может быть нагружена как центрально (при условии симметричного нагружения снегом всей крыши), так

и эксцентрично. Стойку рассматривают как элемент, шарнирно закрепленный по концам. Она может иметь решетчатую форму или форму трубы. Иногда ее используют в качестве барабана для навивки рулонированной поверхности днища.

12.3. Цистерны

Так как давление p от веса жидкости, как правило, очень мало, то определение толщины стенок на основании формулы (12.7) приводит к очень малому значению s . Цистерны с такими стенками не обладают достаточной жесткостью, поэтому расчетные давления определяются согласно специальным техническим указаниям.

Конструктивные формы цистерн и типы сварных соединений выбирают в зависимости от условий работы. Так, для хранения нелетучих жидкостей (вода, масло, мазут) используют цистерны с неотбортованными днищами; их приваривают к обечайке угловыми швами. Сварные соединения листовых элементов обечайки нахлесточные. При этом днища делают коническими или даже плоскими. Плоские днища просты для изготовления, но при нагрузениях возникают значительные напряжения от изгиба и возможно возникновение пластических деформаций. Для исключения пластических деформаций используют днища с отбортовкой, как это видно на рис. 12.5, где приведен пример горизонтальной стационарной цистерны из стали Ст3 объемом 75 м^3 . Цилиндрическая часть имеет продольные стыковые швы, расположенные вразбежку, и кольцевые нахлесточные соединения с угловыми швами. Толщина стенок цилиндрической части и днища $s=4 \text{ мм}$. Днища сварены из нескольких листов стыковыми соединениями и имеют эллиптическую форму. Сопряжения цилиндра с днищем плавные.

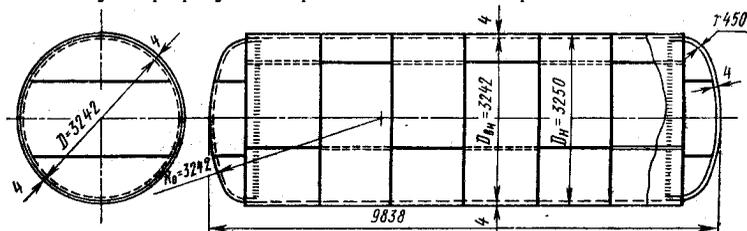


Рис. 12.5. Сварная горизонтальная цистерна

В цистернах, предназначенных для транспортирования жидких продуктов, при движении возникают удары жидкости в днище, равносильные возникновению избыточного внутреннего давления. Поэтому все соединения транспортных цистерн выполняют стыковыми, как в сосудах, работающих под внутренним давлением, в том числе и соединение кромки отбортованного днища с цилиндрической обечайкой.

Типичны цистерны - вагоны для перевозки жидких продуктов. Ввиду их большого диаметра и большой жесткости они выполняют функцию несущей конструкции, поддерживаемой вагонными тележками.

В листовых конструкциях возле отверстий для приварки различного рода труб, патрубков, штуцеров образуются местные напряжения, создающие значительную концентрацию. Для ослабления эффекта выреза прибегают к местным усилениям стенки, например, приваривают кольца, как это показано на рис. 12.6, а. Такое усиление применяют наиболее часто в резервуарах. Если диаметр патрубка невелик, применение усиливающего кольца становится необязательным (рис. 12.6, б). Для повышения плотности соединения рационален глубокий провар шва (рис. 12.6, в) и применение деконцентраторов напряжений. Устранение концентрации напряжений достигается применением соединений, изображенных на рис. 12.6, г. Их применяют, несмотря на то, что они наиболее трудны в технологическом отношении.

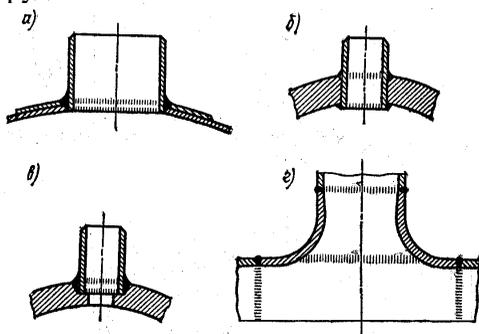


Рис. 12.6. Приварка патрубков:

а — усиливающим кольцом; б — при малом диаметре патрубка; в — при глубоком проваре; г — с устранением концентраций напряжений

Приварка патрубков к резервуарам оказывает значительное влияние на их прочность при работе под переменными нагрузками.

12.4. Газгольдеры и сферические резервуары

Газгольдеры конструируют в форме сосудов постоянного давления или постоянного объема. Последние более просты в изготовлении и позволяют хранить газ под высоким давлением. Газгольдеры переменного объема эксплуатируются при низком давлении. Чаще применяют мокрые газгольдеры, в нижней части которых помещается вода. Над водой находятся телескоп и колокол. Колокол под давлением газа может подниматься вверх вместе с телескопом. Колокол и телескоп зачерпывают воду своими карманами, которые служат затвором, не пропускающим газ наружу. Толщина стенок 4 мм, крыши колокола 2...3 мм. Газгольдеры постоянного объема (рис. 12.7) обычно имеют цилиндрическую форму диаметром несколько метров с выпуклыми, а нередко полусферическими днищами. Продольные и кольцевые швы — стыковые. Все швы (продольные и поперечные в цилиндрической части, а также в сферах) являются рабочими.

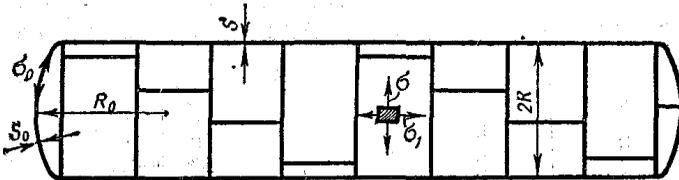


Рис. 12.7. Газгольдер постоянного объема

Напряжение в продольном шве цилиндрической части радиусом R с толщиной стенки s :

$$\sigma = \frac{pR}{s}, \quad (12.14)$$

а в поперечном шве

$$\sigma = \frac{pR}{2s}. \quad (12.15)$$

Напряжения в сферической части радиуса R_0 с толщиной стенки s_0 составляют

$$\sigma = \frac{pR_0}{2s_0}. \quad (12.16)$$

Подбор толщины стенок производят обычно по допускаемым напряжениям с учетом в первую очередь прочности продольного шва.

Газгольдеры постоянного объема могут быть со сферическим дном (рис. 12.8), а также в форме сферы. При замене цилиндрических газгольдеров сферическими достигается экономия металла около 20%. В таких резервуарах соединения лепестков стыковые. Толщина лепестков обычно составляет 10...30 мм и, как правило, не превышает 40 мм. Это ограничение толщины диктуется отсутствием термообработки конструкции после сварки.

Напряжения в стенке сферического резервуара определяют по формуле (12.16). Они в два раза меньше, нежели в цилиндрическом, при одинаковых радиусах и толщинах стенок. Поэтому вес сферических резервуаров меньше, но конструкция сложнее.

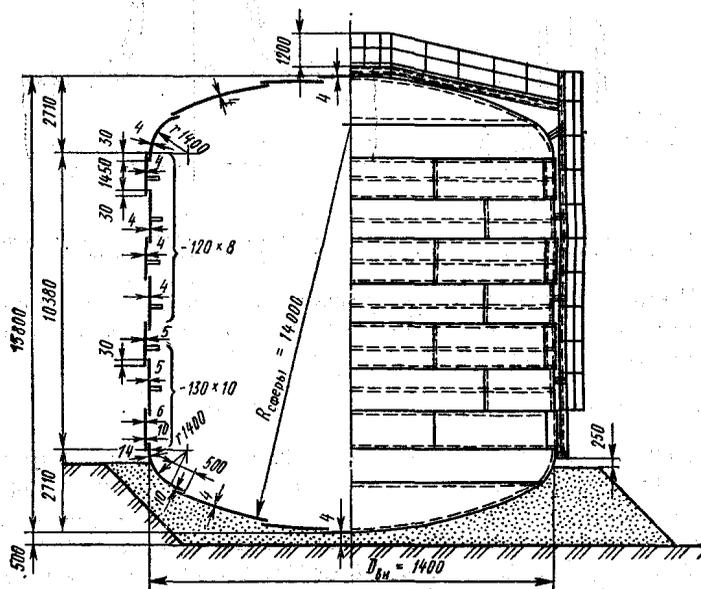


Рис. 12.8. Пример конструкции резервуара со сферическим дном

На рис. 12.9 изображен пример каплевидного резервуара, близкого по форме к сферическому.

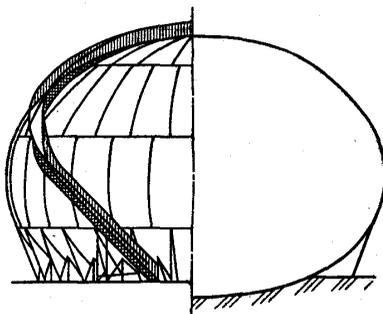


Рис. 12.9. Конструкция каплевидного резервуара

В то время как каплевидный резервуар опирается на мягкий грунт, сферический поддерживается жесткими металлическими опорами, вызывающими неравномерное распределение напряжений в зоне опор. Недостатком каплевидного резервуара по сравнению со сферическим является несколько усложненная технология изготовления. Каплевидные резервуары распространения не получили, а сферические, напротив, применяются широко.

12.5. Применение специальных сплавов для изготовления резервуаров и цистерн

Большое распространение получило строительство резервуаров и различного рода химической аппаратуры, работающих при низких температурах. Для таких конструкций очень важно выбрать материал, не подверженный хрупким разрушениям. Для изделий, работающих при температуре до -60°C , применяют углеродистые стали с небольшим содержанием никеля (1...3,5%). Для конструкций, работающих при более низких температурах, применяют стали, содержащие 5% никеля; при этом необходима специальная термическая обработка. Сварку резервуаров из этих сталей можно успешно производить дуговыми автоматами, легированной проволокой. При этом допускаемые напряжения для сварных соединений составят около 200 МПа.

Резервуары, работающие при низких температурах, нередко устанавливают на судах. В результате вибраций от волн в этих судах в процессе эксплуатации в отдельных случаях возникали

трещины усталости. Сталь с содержанием до 9% никеля хорошо работает в таких условиях при температуре конструкции до -160°C . Предел прочности при этой температуре 650 МПа. Предел выносливости сварных соединений при пульсирующих нагрузках и обычном оформлении стыковых швов 100...110 МПа, а при последующей механической обработке 245 МПа.

Ударная вязкость в зоне, где температура при сварке достигает 900°C , уменьшается в два раза, а в зоне, где $T=1275^{\circ}\text{C}$, — в 5. . .6 раз по сравнению с ударной вязкостью зон, не подвергавшихся нагреву.

Для хранения жидкого водорода изготавливают сварные сосуды из сплава, содержащего 60% железа и 40% никеля.

Успешно применяют для сварных сосудов, работающих при низких температурах, алюминиевые сплавы, которые свариваются дуговым и электрошлаковым способами. Нередко их изготавливают двухступенчатыми. Алюминиевые сплавы обладают повышенной стойкостью против коррозии, малой плотностью и сохраняют пластические и вязкие свойства при работе в условиях низких температур. Из листовых элементов изготавливают различные резервуары, стационарные и транспортные цистерны, вакуумные аппараты, теплообменники.

Контрольные вопросы:

1. Какие виды конструкций относятся к оболочковым?
2. В чем состоит расчет оболочек по методу Лапласа? В чем особенности расчета тонкостенных оболочек?
3. Какие виды напряжений возникают в цилиндрической части резервуара хранилища?
4. Какие виды напряжений возникают в плоских днищах резервуаров хранилищ и в зонах их соединений в цилиндрической части?
5. В чем состоит метод расчета резервуаров по предельному состоянию?
6. Как определяются напряжения в кольцевых швах, в частности постоянного объема?
7. Укажите пути уменьшения концентраций напряжений в зонах сосуда, ослабленных отверстиями.

Лекция № 13

Сварные листовые конструкции

План:

- 13.1. Тонкостенные сосуды
- 13.2. Трубы и трубопроводы
- 13.3. Достижения в строительстве оболочковых конструкций
- 13.4. Барабаны котлов
- 13.5. Коррозия оболочковых конструкций

13.1. Тонкостенные сосуды

По назначению, толщине листовых элементов, применяемым материалам и приемам сварки, сосуды, работающие под давлением, весьма разнообразны. Общим для такого типа конструкций является требование обеспечить возможно более равномерное распределение напряжений. Этого достигают применением стыковых соединений, плавным сопряжением стыкуемых элементов и обеспечением надежного проплавления всей их толщины при условии всемерного исключения дефектов сварки.

Тонкостенные сосуды обычно являются конструктивными элементами различных транспортных установок. Правильное представление о предельной несущей способности тонкостенного сосуда можно получить при рассмотрении его работы в пластической стадии. Особенностью является то, что при работе стенок за пределом упругой деформации и деформировании металла по всем направлениям максимальные кольцевые напряжения цилиндрических и сферических сосудов определяются в зависимости от диаграммы растяжения металла, которая приближенно выражается соотношением

$$\sigma = A\varepsilon^n, \quad (13.1)$$

где σ и ε — истинные напряжения и деформации; A и n — коэффициенты, зависящие от механических свойств металла.

В цилиндрическом сосуде при монотонном нагружении максимальное давление достигается при кольцевой пластической деформации $\varepsilon_1 = n/2$. Действительная конструкционная прочность сосудов в результате концентрации напряжений может оказаться ниже предельной. Большое влияние оказывает отношение σ_T / σ_B . В случае, если $\sigma_T / \sigma_B = 0,6 \dots 0,75$,

конструктивная прочность сосуда приближается к предельной. Если $\sigma_T / \sigma_B = 0,9$, то конструкционная прочность может оказаться значительно меньше предельной.

Если в тонкостенном сосуде создается вакуум, то оболочки надо проверить на устойчивость. Цилиндрические оболочки при длине $110r$ (r — радиус цилиндра) проверяются по формуле

$$\sigma_{кр} = 0,55Er \left(\frac{s}{r} \right)^{3/2} / l, \quad (13.2)$$

где $\sigma_{кр}$ — критическое напряжение; s — толщина оболочки; E — модуль упругости.

Устойчивость сферической оболочки определяется формулой

$$\sigma_{кр} = 0,1Es / r. \quad (13.3)$$

Допускаемое напряжение $[\sigma]_p \leq (0,5 \dots 0,6) \sigma_{кр} m$, где $m = 0,8$ — коэффициент условий работы.

Тонкостенные сосуды в виде различных тормозных баллонов для наземного транспорта изготавливают крупными сериями, используя хорошо свариваемые материалы относительно невысокой прочности. Примером может служить воздушный тормозной резервуар железнодорожного вагона из углеродистой стали (рис. 13.1). Он имеет отбортованные днища, приваренные к обечайке стыковым соединением. Его выполняют либо на остающемся подкладном кольце (рис. 13.1, а), либо с проточкой отбортованной части днища (рис. 13.1, б).

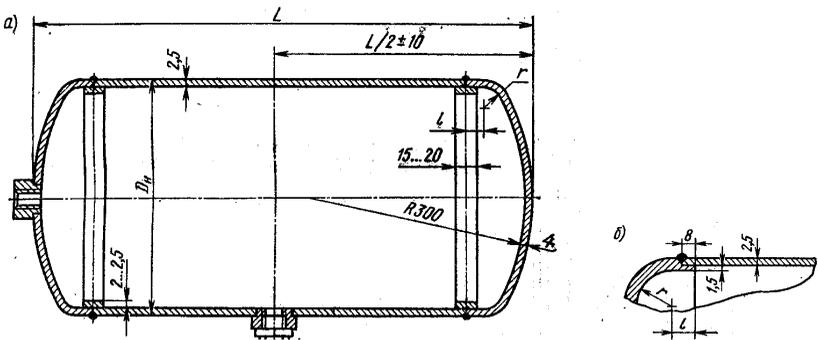


Рис. 13.1. Воздушный тормозной резервуар железнодорожного вагона

13.2. Трубы и трубопроводы

Сварные трубы большого диаметра широко используют при сооружении магистральных газонефтепроводов. Для изготовления таких труб применяют низколегированные стали 14ХГС, 17ГС, 17Г1С и др. Толщина стенок труб 8. .20 мм, диаметр 529. .1420 мм.

Из сварных труб сооружают также трубопроводы металлургических и других заводов, гидротехнических сооружений, а также трубопроводы атомных и тепловых электростанций. При этом трубы, работающие при температуре от -10 до +350 °С и давлении $p \leq 9$ МПа, изготавливаются из стали Ст3сп и низколегированных сталей 10Г2СД, 14ХГС. Трубы, работающие при температуре от —50 до +350 °С и давлении $p \leq 70$ МПа,— из сталей 20 и 30ХМА. Трубы, работающие при высоких температурах (до 600 °С),— из молибденовых сталей, например, 15ХМ и др. Для работы в агрессивных средах трубы изготавливают из аустенитных нержавеющей сталей, алюминиевых, титановых и других сплавов. Кроме того, сварные трубы широко применяют в санитарно-техническом строительстве и в ряде специальных областей техники.

Сварные трубы имеют продольные или спиральные швы, при монтаже трубопроводов отдельные трубы свариваются между собой поперечными кольцевыми швами. Прочность трубопроводов оценивают с учетом различного рода усилий, действующих в процессе эксплуатации. Расчет продольных стыков при внутреннем давлении p производят по формуле

$$\sigma = \frac{pR}{s} . \quad (13.4)$$

В кольцевых стыках создается напряжение, определяемое по формуле

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2s} , \quad (13.5)$$

где R и s — соответственно радиус и толщина стенки трубы.

При понижении внешней температуры в кольцевых стыках образуются напряжения

$$\sigma_2 = \alpha \Delta T E , \quad (13.6)$$

где α — коэффициент температурного расширения металла; ΔT — изменение температуры; E — модуль упругости.

Если труба будет испытывать изгибающий момент M от собственного веса и веса жидкости, то при расчете следует учитывать образование в кольцевых швах напряжений

$$\sigma_3 = \frac{M}{W}, \quad (13.7)$$

где W — момент сопротивления сечения трубы. Момент M определяется по специальным техническим условиям.

Суммарное напряжение в кольцевых швах определяется следующим образом:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_p. \quad (13.8)$$

Допускаемое напряжение в трубопроводах зависит от расчетного сопротивления R_p (обычно $R_p=0,9$), коэффициента условий работы m и коэффициента надежности n ; $m=0,8\dots0,9$, а в местах перехода через препятствия $m=0,75$; $n=1,2$ для газопроводов и $n=1,15$ для нефтепроводов.

Трубопроводы иногда устанавливают на опорах: анкерных, устанавливаемых в конечных точках и в местах изменения направления оси; промежуточных, не препятствующих продольным перемещениям. Конструкции опор зависят от диаметров труб. При относительно малых диаметрах ($d \leq 0,6$ м) допускается применение опор простейшего типа — скользящих; при средних диаметрах ($d=0,6\dots1,5$ м) — седловых; при больших ($d > 1,5$ м) — катковых или качающихся.

Если трубопровод большого диаметра ($d > 1,5$ м) (рис. 13.2, а) выполняет функции газопровода низкого давления, он подвержен воздействию собственного веса (рис. 13.2, в), обледенения (рис. 13.2, г), внутреннего давления газа (рис. 13.2, д), возможного разряжения (рис. 13.2, б), а также ветра и изменения температуры.

Нагрузка q от собственного веса трубопровода равномерно распределена. Приблизительно трубопровод можно принять за многоопорную неразрезанную балку. При этом изгибающий момент на опоре

$$M_q = \frac{ql^2}{8}. \quad (13.9)$$

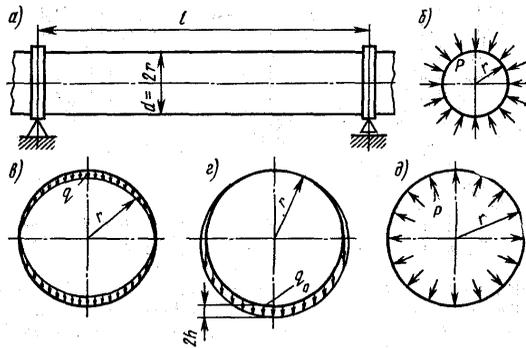


Рис. 13.3. Схема загрузки трубопровода (а) от вакуума (б), от собственного веса (в), от обледенения (г), от внутреннего давления (д)

Напряжение от момента

$$\sigma_q = \frac{M_q}{W}, \quad (13.10)$$

где $W = [\pi(r_1^4 - r_2^4)] / (4r_1)$ — момент сопротивления кольца; r_1 — наружный радиус кольца; r_2 — внутренний радиус.

Аналогично определяются усилия и напряжения при обледенении. Если принять толщину слоя льда в нижней точке $2h$, а в верхней точке равной нулю, то отношение веса обледенения к длине, выраженное в кН/м, определяется по приближенной формуле

$$q_0 = 7rh\gamma, \quad (13.11)$$

где γ — удельный вес льда.

Примем $h=0,1$ м. Тогда получим $q_0 = 0,7r\gamma$, момент от обледенения

$$M_{q_0} = q_0 \frac{l^2}{8}; \quad (13.12)$$

напряжение от момента

$$\sigma_{q_0} = \frac{M_{q_0}}{W}. \quad (13.13)$$

Если замыкание трубопровода производилось при температуре T_1 , то при понижении температуры до значения T_2 в нем возникает продольное растягивающее усилие

$$N_T = 2\pi r s (T_1 - T_2) E \alpha, \quad (13.14)$$

где α — коэффициент температурного расширения, для стали $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$; s — толщина стенки трубы.

Наряду с продольной силой в стенке трубопровода при неравномерном охлаждении возникают напряжения изгиба

$$\sigma_T = \alpha E (T_n - T_в) / 2, \quad (13.15)$$

где T_n — температура наружной поверхности трубы; $T_в$ — температура внутренней поверхности.

Усилие от внутреннего давления p в зоне изменения направления трубопровода вызывает в его поперечном сечении напряжение

$$\sigma_{\text{поп}} = \frac{pr}{2s}. \quad (13.16)$$

Таким образом, полное напряжение в поперечном сечении, а также в кольцевом шве трубопровода

$$\sigma_{\text{расч}} = \sigma_q + \sigma_{q_0} + \alpha E (T_1 - T_2) + 0,5 \alpha E (T_n - T_в) + \frac{pr}{2s} \leq [\sigma']_p. \quad (13.17)$$

В продольном сечении трубопровода образуются напряжения, определяемые по формуле

$$\sigma_{\text{прод}} = \frac{pr}{s} \leq [\sigma']_p. \quad (13.18)$$

В одних случаях большим по значению оказывается напряжение $\sigma_{\text{расч}}$, в других — $\sigma_{\text{прод}}$

Если возможно образование разряжения (рис. 13.3, б), внешнее давление воздуха вызывает в продольных сечениях оболочки трубопровода напряжения сжатия, которые могут достигать критического значения и вызывать потерю устойчивости. Если принять трубопровод за длинную цилиндрическую трубу без закреплений, то критическое давление определяется по формуле:

$$p_{\text{кр}} = \frac{3EJ_1}{r^3}, \quad (13.19)$$

где J_1 — момент инерции относительно собственной оси продольного сечения трубопровода длиной 1 м ; r — средний радиус оболочки.

Для повышения устойчивости оболочки иногда предусматривают постановку кольцевых ребер жесткости. Их типы уголкового и таврового профилей изображены на рис. 13.3. Критическое давление $p_{кр}$ в этом случае находят из соотношения

$$p_{кр} = \frac{3EJ}{lr^2}, \quad (13.20)$$

где l — расстояние между смежными ребрами жесткости; J — момент инерции кольца и оболочки на длине

$$a = 1,6\sqrt{rs}. \quad (13.21)$$

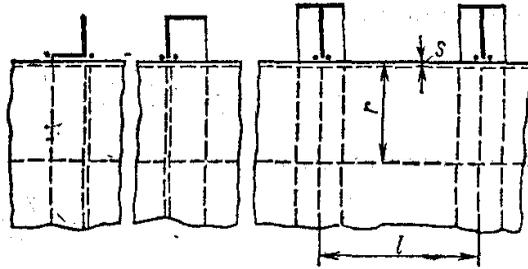


Рис. 13.3. Кольца жесткости уголкового и таврового профилей, приваренные к трубопроводу

При вычислении $p_{кр}$ по формулам (13.20) и (13.21) должно выполняться неравенство

$$p_{кр} \geq m(p_{внеш} - p_{внутр}). \quad (13.22)$$

В этом случае $m=1,7$.

Чтобы уменьшить продольные усилия, возникающие в трубопроводе вследствие изменения температуры, применяют различные способы. В некоторых случаях трубопроводы укладывают на катковые опоры, усиливая трубопровод в этом месте кольцом жесткости. Для повышения податливости в продольном направлении трубопроводы иногда опирают на качающиеся стойки, используют также компенсаторы.

Трубопроводы с высоким внутренним давлением (напорные), применяемые в гидротехнике, проектируются согласно изложенным принципам.

В трубопроводах, работающих при относительно невысоких внутренних давлениях, возможно применение плоско-

сворачиваемых труб. Эти трубы обладают малой массой и достаточно хорошими эксплуатационными свойствами.

Как правило, трубопроводы рассчитывают в основном на статическую нагрузку. В особых случаях учитывают пульсацию давления транспортируемой среды и импульсный характер ветровых нагрузок. В магистральных трубопроводах могут возникать протяженные разрушения, когда местный разрыв стенки трубы сопровождается быстрым продвижением трещины на десятки или же сотни метров. Такой тип разрушения имеет место только в газопроводах. Это происходит вследствие того, что скорость продвижения конца трещины оказывается весьма большой, и давление газа внутри трубы не успевает снизиться до того уровня, который требуется для остановки трещины. С увеличением давления газа, диаметра трубопровода и толщины его стенки опасность появления таких разрушений увеличивается, особенно при низких температурах. Для исключения опасности протяженных трещин можно либо использовать трубы из металла с высокой сопротивляемостью развитию разрушения, либо переходить к многослойным трубам из относительно тонких листов. Однако стали с высоким сопротивлением развитию разрушения требуют введения легирующих добавок, которые дороги.

13.3. Достижения в строительстве оболочковых конструкции

В ИЭС им. Е. О. Патона Украины был разработан индустриальный метод изготовления различных видов листовых конструкций. Цилиндрическая часть крупнейших резервуаров первоначально сваривается в заводских условиях, далее рулонизируется и в рулонизируемом состоянии транспортируется на площадку, где устанавливается и производится сварка лишь замыкающих стыков. Замена сложной монтажной сварки, выполняемой ручным способом, автоматической сваркой в условиях цеха обеспечила значительное улучшение качества и повышение производительности.

Рулонизируется не только цилиндрическая часть резервуаров, но и днища, а также сферические резервуары. Это подлинная техническая революция в строительстве оболочковых объектов.

Трудной операцией является монтажная дуговая сварка кольцевых швов труб газопроводов, уложенных в траншее в неповоротном состоянии.

Большой объем работ проводится по сварке кольцевых швов труб малых тонкостенных диаметров (15...150 мм). Разработаны различные автоматические установки для их соединений в среде защитных газов при обходе инструментом с плавящимся или неплавящимся электродом по всему периметру трубы. В настоящее время трубы небольших диаметров изготавливаются также из полимеров. Сварка кольцевых соединений производится горячим лезвием и методом трения.

Выдающимся достижением является создание на основе разработок ИЭС им. Е. О. Патона Украины высокоавтоматизированных установок «Север» для контактной сварки труб, уложенных в траншеи в неповоротном состоянии. Указанные установки сваривают стык за несколько десятков минут; время, затрачиваемое на сварку такого стыка сварщиком вручную, составляет около двух рабочих дней.

В МГТУ им. Баумана России был впервые отработан способ радиочастотной сварки, который нашел широкое распространение при изготовлении труб из тонкостенного материала ($s=6...7$ мм); обладает огромной производительностью и исключает применение ручного труда.

13.4. Барабаны котлов

В котельные агрегаты, работающие под давлением, входят барабан, экономайзеры, пароперегреватели и камеры.

Барабаны котлов высокой производительности имеют диаметры 1600...1800 мм, толщина их стенок достигает 100 мм, длина бывает различной. Барабан состоит из отдельных обечеек, днища барабанов, как правило, штампованные. Все соединения барабанов выполняются электрошлаковой сваркой.

При температуре котла меньше 450°C применяют трубы из углеродистых сталей, при более высокой температуре применяют трубы из низколегированной стали.

Котлы, пароперегреватели, экономайзеры подлежат освидетельствованию и контролю качества сварных соединений физическими методами: рентгеновскими или гамма-лучами радиоактивных элементов. Просвечивание швов часто заменяется их прозвучиванием ультразвуковыми колебаниями.

Сосуды, предназначенные для работы при очень высоком давлении, выполняют многослойными, так как при сплошной стенке напряжения на внутренней ее поверхности оказываются

значительно большими, чем на внешней, и прочность материала стенок использовать полностью не удастся. Формируя стенку из отдельных слоев, можно путем предварительного натяжения каждого слоя создать такое распределение напряжений, которое при рабочем нагружении сосуда внутренним давлением обеспечит относительно равномерную работу всех слоев.

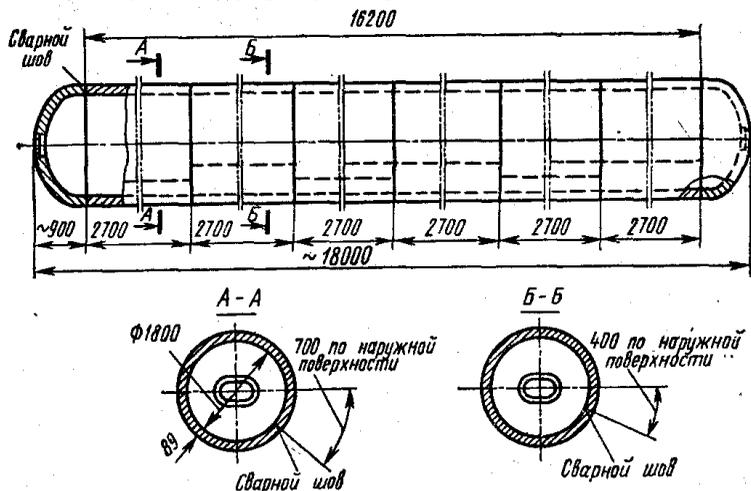


Рис. 13.4. Общий вид сварного барабана котла ТП-80

На рис. 13.4 изображен барабан котла ТП-80. Его длина 16,2 м, толщина стенок 89 мм. Все соединения сварены встык, продольные швы — вразбежку.

Конструктивное оформление таких сосудов и способы создания начальных напряжений при изготовлении многослойных обечаек могут быть различными.

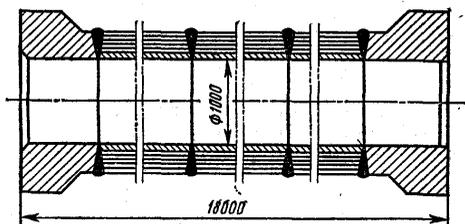


Рис. 13.5. Конструктивное оформление многослойного сосуда

Изготовленные одним из этих способов многослойные обечайки сваривают между собой встык кольцевыми швами, к обоим концам цилиндрической части сосуда приваривают днище или кованные фланцы для крепления крышек (рис. 13.5).

13.5. Коррозия оболочковых конструкций

Большая часть сварных конструкций, подверженных воздействию активных коррозионных сред, представляет собой конструкции оболочкового типа (реакторы, емкости, баллоны, трубопроводы). Коррозия определяется главным образом свойствами основного и присадочного металла, агрессивностью среды, условиями напряженного состояния и технологией сварки. Существенное влияние на коррозию оказывают также температура, кавитация и другие физические эффекты. Наиболее типичные формы коррозии сплошная, или общая, и местная. Местная коррозия может быть межкристаллитной, если она происходит в зоне перехода от шва к основному металлу, ее называют ножевой.

Общая (сплошная) коррозия имеет место в низкоуглеродистых сталях и в сварных соединениях сталей, алюминиевых сплавов (АМг6, АД) в атмосферных условиях, в соленой воде и т. д. Общая коррозия оценивается уменьшением массы, глубиной коррозии, изменением механических свойств за данный отрезок времени.

Местная межкристаллитная коррозия развивается в аустенитных сталях и в их сварных соединениях, например, в среде азотной кислоты при различных концентрациях; межкристаллитная коррозия наблюдается в сплавах и соединениях титана ВТ1-1, ОТ4 в различных средах, а также в низкоуглеродистых сталях в щелочных растворах.

Неоднородность поля напряжений, как правило, оказывает незначительное влияние на общую коррозию, но заметно интенсифицирует местные виды коррозии, наиболее опасным из которых является растрескивание. Переменные напряжения способствуют ускорению процесса растрескивания, при этом для коррозионноусталостного разрушения характерно образование многих усталостных трещин на поверхности оболочки, а не только в местах концентрации напряжений, как это обычно наблюдается при нагружениях в нейтральной среде.

В сварных соединениях коррозионное разрушение происходит, как правило, быстрее, чем в основном металле. Это объясняется тем, что сварные соединения неоднородны. Они могут иметь:

- структурно-химическую неоднородность: макронеоднородность, определяемую наличием в соединении различных структурных зон, и микронеоднородность вследствие наличия зерен включений;

- неоднородность напряженного состояния и пластического деформирования;

- геометрическую неоднородность вследствие наличия дефектов формы и внутреннего строения (непровары, трещины), вызывающих концентрацию напряжений. Устранение перечисленных видов неоднородности способствует повышению стойкости сварных соединений против коррозионного растрескивания. С этой целью используют различные мероприятия. Так, при сварке аустенитных сталей в зоне высоких температур возникает структурно-химическая неоднородность вследствие выпадания из раствора хрома, переходящего в карбид хрома. Ободенение стали хромом понижает ее коррозионную стойкость. Для устранения этого явления в сталь вводят легирующие элементы (титан, ниобий), связывающие углерод в карбиды.

Неоднородность поля напряжений и пластических деформаций связана главным образом с наличием остаточных напряжений. Проведение отпуска значительно снижает сумму напряжений ($\sigma_{нагр} + \sigma_{свар}$) в конструкции и улучшает сопротивление коррозионному растрескиванию. Коррозионная прочность существенно улучшается при снижении сварочных напряжений до уровня, соответствующего $0,25\sigma_T$. Поэтому сварные сосуды и оболочки, работающие в коррозионной среде, рекомендуется подвергать общему отпуску при температуре 500...600 °С для снижения остаточных сварочных напряжений и восстановления пластических свойств.

Следует избегать образования концентраторов напряжений. В частности, опасным дефектом являются щели, где легко развивается щелевая коррозия. В этом отношении стыковые соединения лучше нахлесточных и тавровых.

Повышение коррозионной стойкости может быть получено применением защитных покрытий металлов: плакированием,

металлизацией, нанесением гальванических покрытий, окраской. Нанесенные покрытия способствуют торможению разрывов пленок, что является часто очагом пониженных потенциалов и началом коррозионных разрушений.

Контрольные вопросы:

1. В чем состоит проверка тонкостенных конструкций на устойчивость?
2. Какие марки сталей применяются в трубопроводах?
3. Перечислите разновидности напряжений, возникающих в газопроводах.
4. Какие внешние нагрузки действуют на трубопровод помимо внутреннего давления?
5. Какие мероприятия предусматривают против потери устойчивости трубопроводов?
6. Опишите типичные формы конструкций котлов.
7. Какие виды коррозии имеют место в оболочковых объектах при действии агрессивных сред?
8. Какие существуют меры против коррозионного растрескивания трубопроводов?
9. Нанесение каких покрытий повышает коррозионную стойкость трубопроводов?
10. Можно ли изготавливать толстостенные объекты многослойными?

Лекция № 14

Сварные детали машин

План:

- 14.1. Эффективность использования сварки в деталях машин
- 14.2. Проектирование деталей машин
- 14.3. Барабаны
- 14.4. Корпуса редукторов

14.1. Эффективность использования сварки в деталях машин

Изделия тяжелого машиностроения — станины, прессы, валы, различные тепловые установки большой мощности — выпускаются индивидуально или мелкими сериями. Сварные рамы, барабаны имеют толщину стенок до 100 мм и более. При этом часто свариваются электрошлаковым способом. В

исключительных случаях в деталях машин толщина достигает более 2 м.

В процессе изготовления нередко осуществляют промежуточные термические обработки для снятия остаточных напряжений.

Сварные элементы столь больших толщин заменяют крупногабаритные отливки, поковки. Из проката, отливок, поковок меньших габаритов сваривают крупногабаритные объекты, создание которых единым металлургическим процессом оказалось бы трудноосуществимым или даже невозможным. Возможность расчленения проектируемого объекта на составляющие с последующим воссоединением частей в единое целое является одним из ярких достижений сварочной технологии.

Крупногабаритные толстостенные конструкции производятся в судостроении, атомном машиностроении и других видах химического машиностроения. Конструкции изготавливаются из прочных сплавов, нередко хорошо сопротивляющихся воздействию высоких и низких температур. Допускаемые напряжения в таких объектах, как суда, устанавливаются в них с учетом низкочастотных нагрузжений.

Параллельно с применением сварных конструкций тяжелого машиностроения, изготавливаемых в индивидуальном производстве, сварные конструкции часто изготавливаются однотипными крупными сериями. Например, рычаги, кронштейны, рамы, редукторы, зубчатые колеса, шкивы, барабаны, маховики и т. д., представляющие собой элементы целых машин.

Указанные объекты, выпускаемые, как правило, сериями, свариваются дуговой, контактной стыковой и точечной сваркой. Валы свариваются также электрошлаковым способом, трением, в более редких случаях при применении высококачественных материалов в камерах электронным лучом.

Сварка находит широкое распространение в приборах механических, оптических, радиотехнических, электронных.

В этих областях сварочной техники также нужны главным образом точность изготовления и отсутствие изменения размеров с течением времени.

Сварка применяется микроплазменная, контактная, точечная, роликовая, лазерная — преимущественно твердотельная, а также пайка.

В машино- и приборостроении непрерывно используются новые материалы, соединение разнородных металлов с неметаллами, например, металлов с силицидами, карбидами, со стеклом, графитом и т. д.

Соединения из полимеров образуются, как правило, при помощи ультразвука, тонкие металлы — горячим лезвием, высокопластичные — холодным способом. Трудносвариваемые металлы соединяются также диффузией, пайкой, например, керамические изделия и др.

14.2. Проектирование деталей машин

Детали машин сваривают из заготовок, получаемых самыми различными способами.

Многие конструкции сваривают из прокатного материала, к ним относятся рамы, станины, барабаны, корпуса редукторов, зубчатые колеса (рис. 14.1), штанги с проушинами (рис. 14.2), сварные тяги (рис. 14.3). На рис. 14.4. приведены сварные конструкции подшипниковых опор разных систем. Все они выполнены из листового проката с усилением корпусов приваркой ребер жесткости. Замена литых деталей машин сварными позволила получить экономию до 50% массы металла.

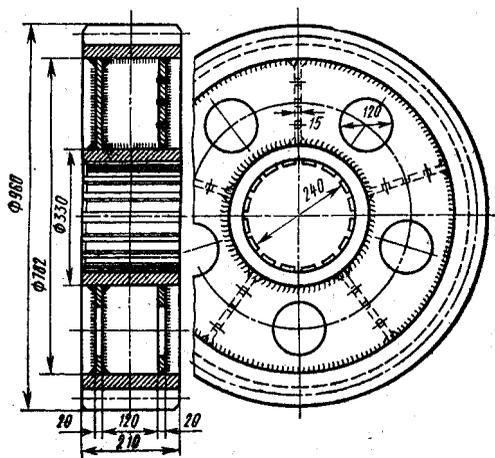


Рис. 14.1. Двустенчатое сварное зубчатое колесо

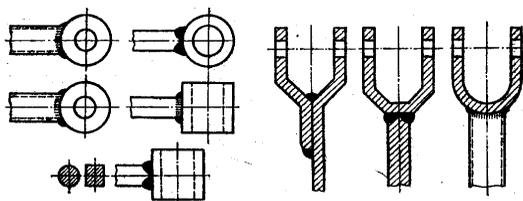


Рис. 14.2. Штанги с проушинами

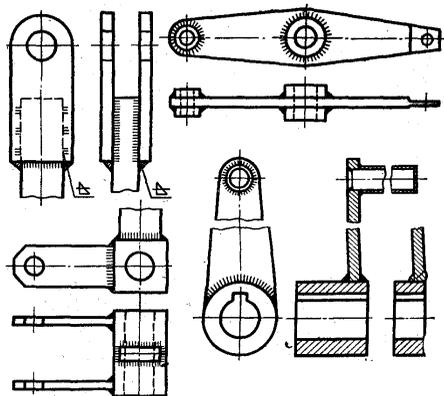


Рис. 14.3. Сварные тяги

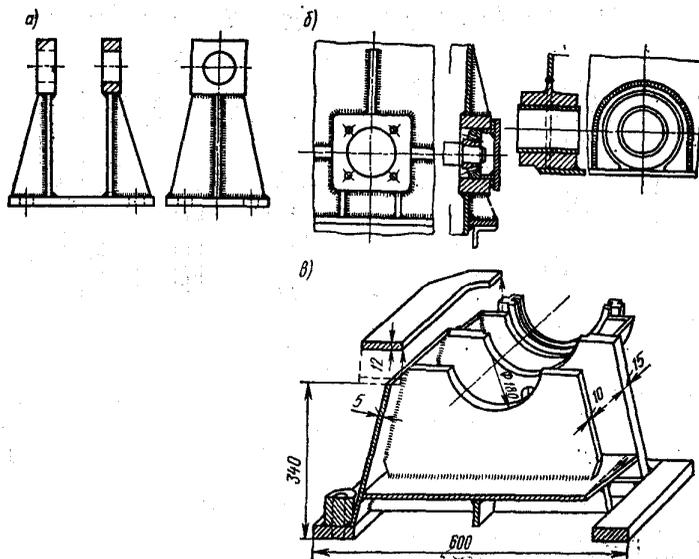


Рис. 14.4. Сварные подшипниковые опоры

При создании новых, все более модных конструкций тяжелого машиностроения (турбин, котлов, металлургического и станочного оборудования) изготовление их деталей и узлов литьем, ковкой и штамповкой представляет большие, иногда непреодолимые трудности. Применение электрошлаковой сварки открыло путь к созданию комбинированных сварных изделий больших размеров из отливок, поковок и проката, экономичных по массе с минимальными припусками на механическую обработку.

Для производства деталей машин средних размеров с общей площадью сечений до 50000 мм² перспективно использовать стыковую контактную сварку. Таким способом изготавливают, например, картеры тепловозных дизелей, собираемые и свариваемые из унифицированных отливок методом последовательного наращивания.

В деталях машин, например, в телескопических соединениях трубчатых элементов разных диаметров, в элементах, соединяемых внахлестку и втавр, в изделиях сложной геометрической формы, при которых наложение сварных швов оказалось бы затруднительным, целесообразно применять пайку.

При проектировании деталей машин следует учитывать факторы.

1. Диапазон применяемых марок сталей широк: наряду с низкоуглеродистыми и низколегированными сталями применяют высоколегированные. Иногда заготовки подвергают термической обработке до сварки.

2. В деталях машин размеры элементов нередко определяются условиями не прочности, а жесткости. В этом случае рабочие напряжения принимаются значительно ниже допускаемых.

3. В деталях машин большое значение имеет точность изготовления. Остаточные напряжения в сварных конструкциях, находящихся в эксплуатации, с течением времени меняют свое значение. Вследствие этого в конструкции появляются деформации. Поэтому сварные изделия, изготавливаемые и обрабатываемые по высшим качествам точности, необходимо после сварки подвергать термической обработке (отпуску в нагревательных печах) Особенно необходима высокая точность изготовления в конструкциях с зубчатыми зацеплениями, роторных линиях, гироскопических установках.

4. В зонах сварных соединений некоторых низколегированных сталей происходит процесс замедленного распада аустенитной структуры, вызывающий деформирование соединения в течение некоторого времени. В процессе эксплуатации сварных соединений из низкоуглеродистой и аустенитной стали изменение размеров обычно не происходит. Существуют разные мероприятия для устранения этого вредного явления. Одно из них применение рациональной термической обработки изделия после сварки. Полезно снятие остаточных напряжений, так как возникающие при этом пластические деформации ускоряют процесс стабилизации структур.

5. Механическую обработку сварных деталей машин следует, как правило, производить после отпуска, так как удаление части сечения вызывает перераспределение остаточных напряжений и искажение ранее обработанных поверхностей. Однако эти искажения зависят от жесткости разрабатываемых деталей, а также размера снимаемого слоя и могут быть невелики. Поэтому очень часто сварные изделия обрабатывают, не производя вовсе отпуска.

6. «Горячий монтаж», т. е. сборку и сварку механически обработанных заготовок без последующей механической обработки готовой детали, можно применять только при тщательной обработке технологии сварки.

Детали машин часто воспринимают действие динамических нагрузок. Это требует проектирования конструкций с возможным устранением концентраторов напряжений. Влияние динамических нагрузок учитывают с помощью коэффициента η .

Расчетное усилие при этом

$$P = P_{\text{пост}} + P_{\text{пол}} \eta, \quad (14.1)$$

где $P_{\text{пост}}$ — усилие от постоянных нагрузок; $P_{\text{пол}}$ — усилие от полезных нагрузок. Значения η зависят от вида машины и характера ее работы:

Электромашины, шлифовальные станки, роторные компрессорные турбины	1,0...1,1
Двигатели внутреннего сгорания, поршневые насосы и компрессоры.....	1,2...1,5
Волоочильные станки, рычажные прессы, пильные рамы.....	1,5...2,0
Прокатные станы, камнеломные машины.....	2,0...3,0

Помимо увеличения заданных значений статических усилий при проектировании деталей машин производится снижение допускаемых напряжений с учетом вибрационного действия на деталь. Допускаемые напряжения в сварных соединениях деталей машин снижаются относительно допускаемых напряжений $[\sigma']_p$ путем умножения на коэффициент γ_0 , вычисляемый в зависимости от эффективного коэффициента концентрации сварного соединения K_σ .

Таким образом, площадь расчетного сечения шва при растяжении элементов

$$A_{трреб} = (P_{пост} + P_{пол}\eta) / [\sigma']_p \gamma_0. \quad (14.2)$$

Аналогичным образом определяют момент сопротивления сечения при изгибе:

$$W_{трреб} = \frac{M_{пост} + M_{пол}\eta}{[\sigma']_p \gamma_c}, \quad (14.3)$$

где γ_c - коэффициент снижения допускаемых напряжений.

14.3. Барабаны

Барабаны используют в шаровых мельницах, центрифугах, но особенно часто их применяют в грузоподъемных машинах и шахтных подъемниках. Размеры барабанов различны. Диаметры их колеблются в широких пределах: от нескольких десятков миллиметров до нескольких метров. Длина барабана зависит от его назначения. Толщина стенок барабана может достигать 75 мм. В большинстве случаев барабан представляет собой сварную конструкцию, изготовленную из листов. Однако в некоторых изделиях основой барабана служит каркас, выполненный из профильного материала. Каркас представляет собой пространственную жесткую систему, к которой приваривают барабанную обшивку. Такие конструкции встречаются сравнительно редко и главным образом в крупных шахтных подъемниках.

Цилиндрическую часть барабана соединяют с торцевыми стенками (днищами). Последние представляют собой плоские круглые листовые элементы, к которым приварены цапфы. В некоторых конструкциях барабанов цапфы являются концами валов, не имеющих разрывов (рис. 14.6, а); в других - концами

валов с разрывом (рис. 14.6, б). Для корпусов барабанов малых диаметров используют трубы или отливки, для средних и больших диаметров корпуса барабанов вальцуют из одного или нескольких листов.

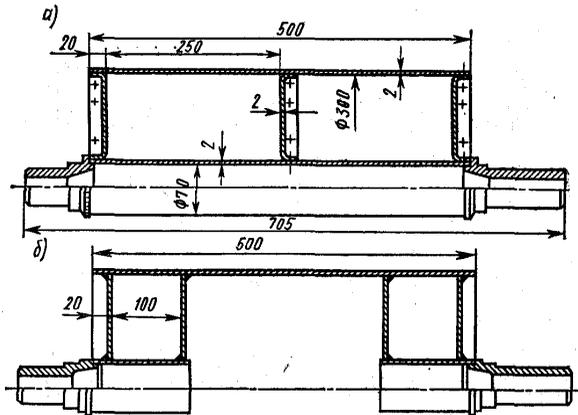


Рис. 14.6. Конструкция сварных барабанов

Рассмотрим схему конструкции барабана шахтного подъемника. Для удобства навивки каната на поверхности барабана предусматривают канавки, соответствующие диаметру этого каната (рис. 14.7, а).

Канавки не должны ослаблять сечение барабана. Усилие от натяжения каната вызывает в барабане сжатие. Если напряжения сжатия превзойдут значение, которое называется критическим, то оболочка потеряет устойчивую форму и выпучится (рис. 14.7, б).

Во избежание потери устойчивости повышают жесткость оболочки. Для этого приваривают кольцевые элементы жесткости: полосы, швеллеры (рис. 14.7, в), различные штампованные профили.

Соединения барабана с торцевой стенкой весьма ответственны, так как передают значительные рабочие усилия. Рациональными являются соединения барабана со стенкой, приведенные на рис. 14.7, г, е; допускается соединение угловыми швами, показанное на рис. 14.7, д, е.

Расчет прочности барабана производят на сжатие, изгиб и кручение. Рассмотрим элемент обода под канатом (рис. 14.7, ж). Усилие в ободу уравнивает силу P , приложенную к канату. Поэтому напряжение сжатия в ободу

$$\sigma = \frac{P}{ds}, \quad (14.4)$$

где d — ширина обода, равная диаметру каната; s — толщина обода (рис. 14.7, з).

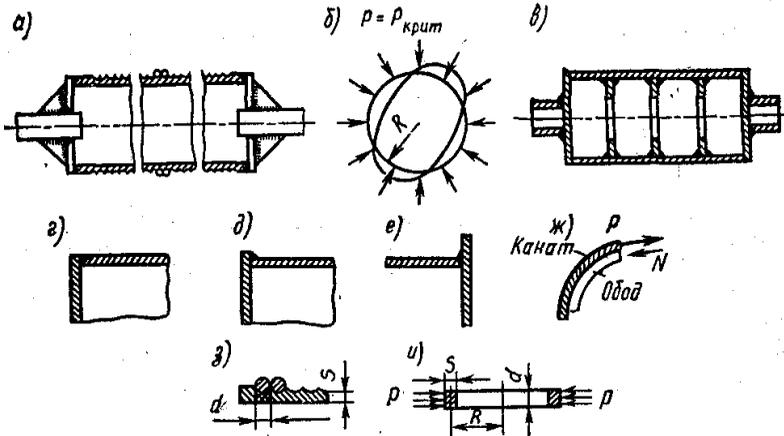


Рис. 14.7. К расчету сварных барабанов:

а — общий вид; б — поперечное сечение при потере устойчивости; в — усиление кольцевыми ребрами жесткости; г, д, е — соединения цилиндрической части с торцевой стенкой; ж — усилия в барабане от натяжения троса; з — к определению рабочей толщины стенки; и — устойчивость кольца

Рассмотрим, в какой степени сжимающие напряжения могут быть опасны для обода с точки зрения потери устойчивости. Допустим, что труба, не имеющая торцевых стенок, сжимается нагрузкой, равномерно распределенной по ее окружности (рис. 14.7, и). Из теории упругости известно, что потеря устойчивости наступает при нагрузке

$$P_{кр} = \frac{3EJ}{R^3}, \quad (14.5)$$

где J — момент инерции продольного сечения стенки трубы относительно оси; E — модуль упругости; R — радиус трубы.

Если принять элемент длины трубы равной d , а толщину стенки — s (рис. 14.7, з), то

$$J = \frac{ds^3}{12}. \quad (14.6)$$

Таким образом, нагрузка определится формулой

$$p_{кр} = Ed(s/R)^3 / 4. \quad (14.7)$$

Установим зависимость между P и p . В цилиндрическом теле, нагруженном по поверхности распределенной нагрузкой p , образуется усилие

$$N = P = pR. \quad (14.8)$$

Подставим вместо p его значение из формулы (14.7), тогда получим

$$P_{кр} = \frac{EdR(s/R)^3}{4}. \quad (14.9)$$

Если принять коэффициент запаса на устойчивость равным 2, то допускаемая сила по устойчивости барабана

$$P_{доп} = \frac{EdR(s/R)^3}{8}. \quad (14.10)$$

Напряжение в барабане, допускаемое с учетом устойчивости, составляет

$$[\sigma]_p \leq 0,5[\sigma]_{кр}. \quad (14.11)$$

Торцевые стенки повышают устойчивость барабана по сравнению с ее допускаемым значением, полученным по формуле (14.10). Если $P_{расч} > 0,5P_{кр}$, то барабан следует усилить постановкой кольцевых элементов жесткости.

Кроме проверки на устойчивость оболочка должна быть проверена также на прочность в зависимости от изгибающего и крутящего моментов. Наибольший изгибающий момент имеет место в середине пролета (см. рис. 14.8):

$$M = Pl / 4, \quad (14.12)$$

где l — расстояние между опорами барабана. Напряжение от изгиба

$$\sigma = M / W. \quad (14.13)$$

Момент сопротивления барабана находится так же, как и в кольцевом сечении:

$$W = j / R_1, \quad (14.14)$$

где R_1 — внешний радиус.

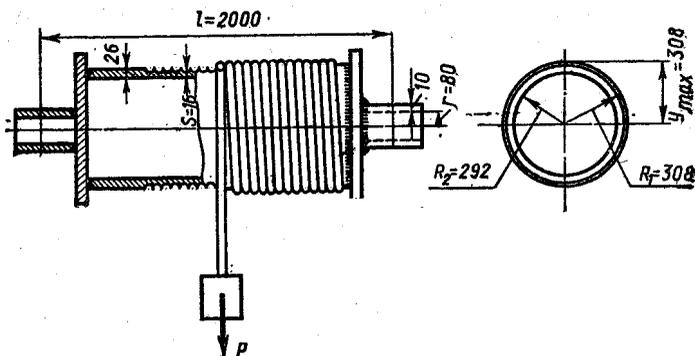


Рис. 14.8. К примеру расчета прочности сварного барабана

Значение крутящего момента зависит от конструкции привода. При расположении его с одного конца вала

$$M_{кр} = PR. \quad (14.15)$$

Напряжение от кручения

$$\tau_{кр} = M_{кр} / W_{кр}, \quad (14.16)$$

где $W_{кр}$ — полярный момент сопротивления.

В большинстве случаев напряжения от изгиба и кручения в барабанах незначительны по сравнению с напряжениями сжатия.

14.4. Корпуса редукторов

Сварные корпуса редукторов представляют собой жесткую коробчатую конструкцию. Такие конструкции получаются значительно легче, чем литые, так как стенки могут быть более тонкими, усиленными элементами жесткости, как показано на рис. 14.9. Масса литых корпусов почти в два раза больше, чем сварных. При индивидуальном и мелкосерийном производстве сварные корпуса редукторов оказываются экономичнее литых.

Корпуса редукторов требуют точного изготовления, поэтому после сварки их подвергают отпуску. Механическая обработка производится после отпуска. Выпускают редукторы со сварными корпусами, передающие весьма большие мощности (свыше 700 кВт). Эти редукторы применяют в прокатных станах металлургических заводов. При изготовлении используют прокатные элементы, гнутые и штампованные профили.

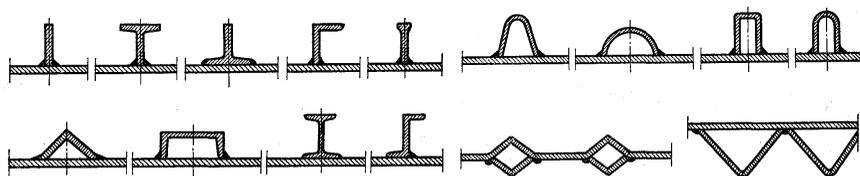


Рис. 14.9. Усиление вертикальных стенок редуктора

14.5. Шестерни и шкивы

Конструкции сварных шестерен, шкивов и маховиков имеют много общего. Их основными частями являются обод, ступица и соединительные элементы, связывающие обод со ступицей. Соединительными элементами служат спицы или сплошные центры. Рассмотрим конструкции сварных шестерен и шкивов.

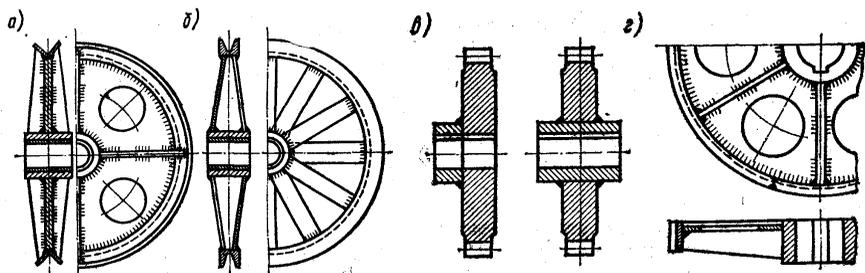


Рис. 14.10. Сварные шестерни и шкивы

На рис. 14.10, а приведен пример легкого шкива с центром и ободом из углока; на рис. 14.10, б — шкив с ободом из швеллера со спицами из полосовой стали; на рис. 14.10, в — зубчатые колеса со сплошным центром; на рис. 14.10, г — зубчатые колеса с ободом, сваренным стыковым соединением. Внутренний диаметр ступицы обычно соответствует диаметру вала. В качестве спиц могут быть использованы трубчатые элементы, тавровые, двутавровые и различные штампованные профили. Ободья шестерен большого размера прежде изготовляли литыми или коваными, в настоящее время их в большинстве случаев вальцуют из толстых листов и сваривают встык. Центр и ребра изготовляют из низкоуглеродистой стали. Для ободьев применяют повышенные сорта кованой и вальцованной стали, например, сталь 30ХГСА, а также углеродистые стали 35, 45 и др.

Швы, приваривающие центр к ступице и к ободу, целесообразно выполнять с подготовкой кромок или с глубоким проплавлением (рис. 14.11, а). При этом концентрация напряжений в соединениях оказывается меньше, а следовательно, прочность при переменных нагрузках больше, чем в конструкции с угловыми швами (рис. 14.11, б).

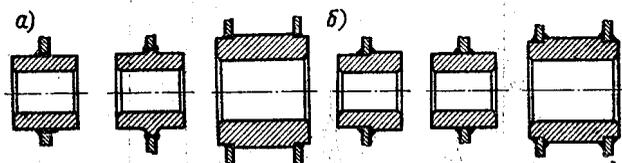


Рис. 14.11. Сварные соединения дисков со ступицами

Центр представляет собой весьма ответственную часть конструкции шестерни. При недостаточной его жесткости во время эксплуатации возникают вибрации, которые могут расстроить зубчатое зацепление. Поэтому центры иногда конструируют двустенчатыми (см. рис. 14.11). Между стенками полезно ставить диафрагмы жесткости. Жесткость двустенчатой шестерни значительно выше, чем одностенчатой. После сварки шестерни подвергают термической обработке (отпуску) в печи для снятия остаточных напряжений. После отпуска производят механическую обработку и нарезку зубьев.

Подобным же образом конструктивно оформляют шкивы и маховики. Они не требуют столь большой точности изготовления и стабильности размеров, как шестерни. Поэтому, как правило, после сварки эти конструкции не подвергают отпуску.

Расчет прочности сварного шкива производят по касательному усилию, приложенному к ободу. Усилие T передается на обод, с обода на ступицу (или на вал) через спицы или центр. Если число спиц менее четырех, то считают, что усилие T воспринимается полностью одной спицей. Таким образом, в спице возникают поперечная сила $Q=T$ и изгибающий момент $M=TI$ (рис. 14.12). Напряжение от изгиба в спице определяется по формуле

$$\sigma = (M / J) y_{\max}, \quad (14.17)$$

где J — момент инерции поперечного сечения спицы относительно оси x (рис. 14.12, г).

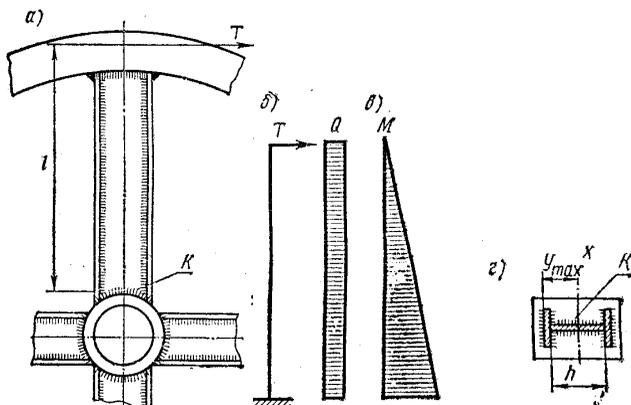


Рис. 14.12. К расчету сварных соединений шкива со спицами:

а — шкив; б, в — эпюры силы Q и момента M по длине спиц; а — соединение спицы со ступицей

Следует определить касательные напряжения в швах спицы, соединяющих ее пояс со стенкой. Если швы угловые с катетом K , то напряжения в них от поперечной силы

$$\tau = \frac{Qs}{2J\beta K}. \quad (14.18)$$

Касательные напряжения τ , определяемые по формуле (14.18), обычно незначительны. В месте соединения спицы со ступицей следует определять напряжения в угловых швах от момента:

$$\tau_M = \frac{M(y_{\max} + K)}{J_c}, \quad (14.19)$$

где J_c — момент инерции периметра шва относительно вертикальной оси.

Напряжение от поперечной силы проверяется только с учетом швов, приваривающих стенку профиля:

$$\tau_Q = Q/A_c, \quad (14.20)$$

где $A_c = 2h\beta K$

Напряжения в соединениях спиц со ступицей от силы Q обычно бывают малы. Прочность в основном определяется напряжением от момента.

Если число спиц $n > 4$, то

$$M < Tl, \quad (14.21)$$

$$q < T. \quad (22)$$

В конструкциях сварных шестерен (рис. 14.13, а) с центрами вместо спиц наиболее нагруженными являются швы, соединяющие центр со ступицей. Они воспринимают усилие T и крутящий момент

$$M = TR. \quad (14.23)$$

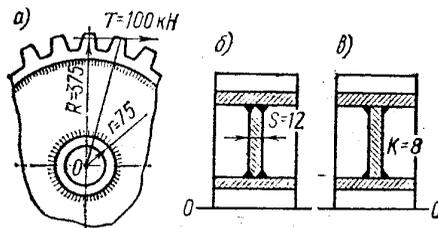


Рис. 14.13. К расчету сварных соединений шестерен со сплошным центром:

а — шестерня; б — соединение центра со ступицей и ободом, с подготовкой кромок; в — соединение центра со ступицей и ободом, без подготовки кромок

Напряжение в соединении ступицы с центром определяется в предположении, что касательные напряжения распределены равномерно по длине шва; на участке длиной, равной единице, усилие в шве с подготовкой кромок (рис. 14.13, б) создает момент

$$m = s \tau r. \quad (14.24)$$

Полный момент

$$M = 2m \pi r = 2\pi r^2 s \tau. \quad (14.25)$$

Напряжение в шве с подготовкой кромок

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2 s}. \quad (14.26)$$

Напряжение в угловых швах (рис. 14.13, в) с катетом K

$$\tau = \frac{M}{4\pi r^2 \beta K}. \quad (14.27)$$

Контрольные вопросы:

1. Назовите примеры объектов машиностроения с применением сварных соединений.
2. Какие специфические требования предъявляются к сварным деталям машин помимо прочности?
3. Какое влияние оказывает объем производства на применение сварных соединений в деталях машин?
4. В каких целях особенно необходима точность изготовления?
5. Каким образом назначаются допустимые напряжения в деталях машин?
6. Каким образом проверяется несущая способность сварных барабанов?
7. Каким образом производится расчет прочности сварных соединений в зубчатом колесе?
8. Как рассчитывать на прочность сварной шов в корпусе редуктора?
9. В каких случаях более рентабельны сварные корпуса по сравнению с литыми или штампованными?

Лекция № 15

Сварные детали машин

План:

- 15.1. Сварные рамы
- 15.2. Сварные детали автомобилей
- 15.3. Сварные детали турбин
- 15.4. Надежность деталей машин

15.1. Сварные рамы

Рамы входят в состав различных машин и конструкций — станков, вагонов, крановых тележек, фундаментов, кузнечно-прессовых и прокатных машин, автомобилей, тракторов, в металлические конструкции зданий. Рамы и станины служат для связи в одно целое отдельных частей механизма или станка. Они должны обеспечивать необходимую жесткость и прочность конструкции и удовлетворять требованиям рациональной компоновки изделия. При расчетах на прочность рамы и станины представляют в виде системы соединенных балок.

Простейшие узлы сварных рам приведены на рис. 15.1. Для увеличения жесткости рам в горизонтальной плоскости

рекомендуется ставить распорки. В целях снижения массы при сохранении жесткости целесообразно применять для легких рам тонкостенные гнутые штампованные уголки, швеллеры и другие профили.

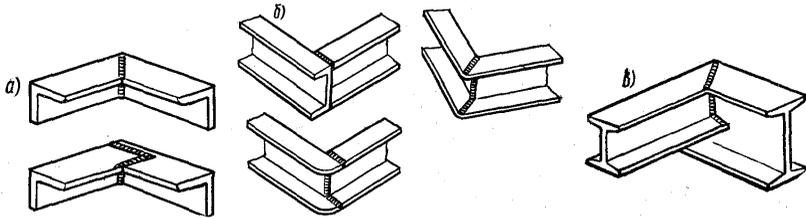


Рис. 15.1. Простейшие узлы рам из уголков (а), швеллеров (б) и двутавров (в)

Для соединения указанных элементов применяют не только дуговую, но и контактную сварку. Так, например, лонжероны — продольные балки сварной рамы автомобиля — выполняют из штампованного швеллера, а поперечные — из элементов замкнутого трубчатого сечения. Привариваются они к лонжеронам контактной сваркой тавровыми соединениями (рис. 15.2, б), а при выштамповке и отбраковке лонжеронов — стыковыми (рис. 15.2, а). Несмотря на резкий переход в сечении трубчатой конструкции к лонжерону, сварная конструкция по прочности превосходит клепаную.

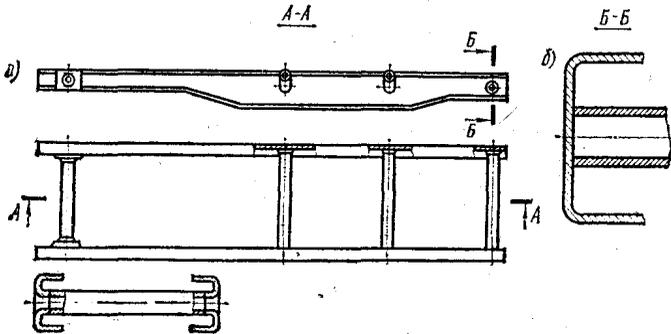


Рис. 15.2. Сварная рама грузового автомобиля

В сварных конструкциях рам применяются сопряжения балок разного типа. Расчетным усилием для них, как правило, является изгибающий момент. Если момент не может быть определен на основе статического расчета, то соединение

целесообразно конструировать равнопрочный основному сечению изгибаемых элементов. При этом расчетный момент

$$M = [\sigma]_p W, \quad (15.1)$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения прикрепляемого элемента; $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение. Условие прочности сопряжений можно записать различными способами, необходимо только отразить условие, что сумма моментов внутренних сил, допускаемых при расчете прочности соединения, равна или больше расчетного момента M .

В рамных конструкциях нередко используются траверсы, которые отличаются от балок значительно меньшими пролетами и более сложными профилями поперечных сечений. Поперечные сечения траверс часто состоят из двух толстых плит (поясов) и заполнения из переборок меньшей толщины.

15.2. Сварные детали автомобилей

Карданный вал автомобиля — весьма ответственная деталь, так как его поломка приводит к аварии. Сварные соединения вилки 1 и шлицевой втулки 2 с карданной трубой 3 (рис. 15.3, б) осуществляют сваркой трением. Учитывая возможность перегрузки, расчетный крутящий момент определяют по формуле

$$M_{кр} = (1,5 \dots 2,0) M_{д} i, \quad (15.2)$$

где $M_{д}$ — момент двигателя; i — передаточное число трансмиссии.

Напряжение в сварном шве от момента

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{кр}} = \frac{2M_{кр}r_1}{\pi(r_1^4 - r_2^4)}, \quad (15.3)$$

где r_1 и r_2 — соответственно внешний и внутренний радиусы кольцевого сечения.

По III теории прочности

$$\sigma_{экр} = 2\tau_{кр} \leq \sigma_{тек} \varphi / n, \quad (15.4)$$

где φ зависит от диаметра вала (при $d=30$ мм, $\varphi=0,85$; при $d=100$ мм, $\varphi=0,76$); $n=1,5 \dots 2,0$, если $\sigma_T / \sigma_B = 0,6 \dots 0,85$ и $n=1,15 \dots 1,6$, если $\sigma_T / \sigma_B = 0,45 \dots 0,6$. Сварные соединения, выполненные сваркой трением, оказываются равнопрочными основному металлу вилки кардана.

Ведущий мост в автомашинах с зависимой подвеской рассматривается в качестве пустотелой балки, связывающей колеса (рис. 15.3, а). В сечении, совпадающем с осью рессор, изгибающий момент с учетом динамического коэффициента

$$M_u = (2 \dots 2,5) Q_0 B, \quad (15.5)$$

где — нагрузка на шину колеса; В — полуразность расстояния К между колесами и расстояния Р между рессорами (рис. 15.3, а).

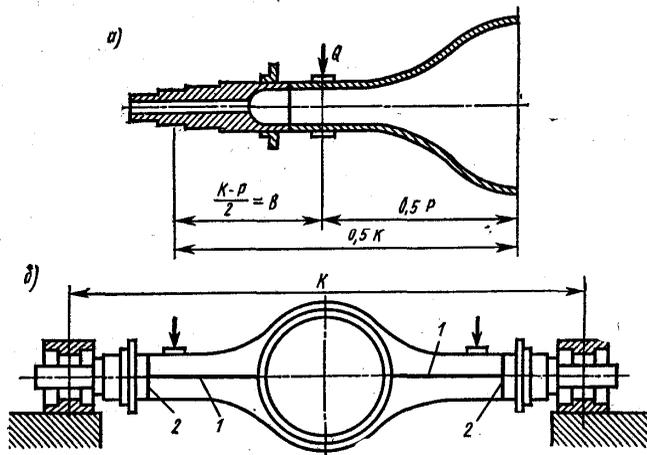


Рис. 15.3. Картер ведущего моста грузового автомобиля
Расчетное $\sigma = 100$ МПа.

Продольные сварные швы 1 (рис. 15.3, б), соединяющие штампованные половинки балки картера, являются связующими и не рассчитываются. Наиболее нагружены сварные соединения 2 цапф с балкой картера, их выполняют сваркой трением.

15.3. Сварные детали турбин

Паровые турбины работают при температуре до 550°C и при давлении пара до 24 МПа. При температурах эксплуатации $T_{\text{экс}} \leq 400^\circ\text{C}$ применяют низкоуглеродистые стали; при $T_{\text{экс}} > 400^\circ\text{C}$ — хромомолибденовые, хромованадиевые стали. Хорошо свариваются жаропрочные аустенитные стали 12X18H10T. Корпуса газовых турбин нагреваются до температуры 800°C , корпуса камер сгорания—до $1000 \dots 1050^\circ\text{C}$. Их

изготавливают из сплавов 20Х23Н18, ХН78Т. Для обеспечения надежности изделий стали подвергают предварительному переплаву, например, электрошлаковому или вакуумно-дуговому. Дуговая сварка производится электродной проволокой, близкой по составу к основному металлу.

Сварные конструкции из проката в отдельных случаях подвергаются высокому отпуску. Сварные конструкции из отливок проходят термическую обработку всегда. Все наиболее нагруженные соединения — стыковые; в менее нагруженных деталях допускаются нахлесточные.

Коэффициенты запаса прочности $n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{расч}}$ в узлах турбин

устанавливаются следующие:

Цилиндры и корпуса.....	1,65
Сварные роторы.....	2,30
Сварные диафрагмы.....	1,65
Лопатки.....	1,25

При расчете прочности лопаток учитывается знакопеременное усилие.

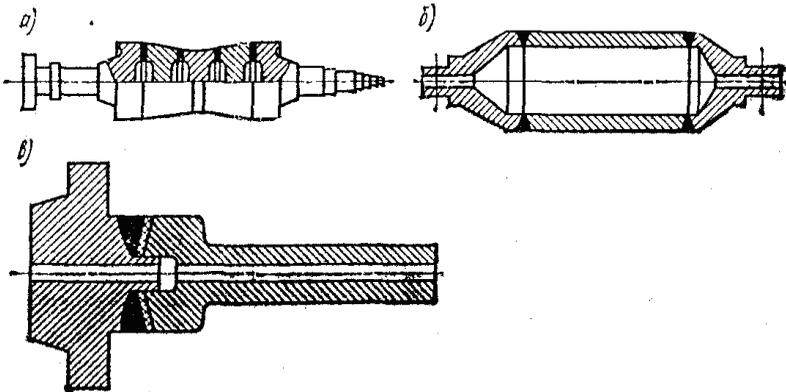


Рис. 15.4. Типы сварных роторов

Сварные роторы дискового типа показаны на рис. 15.4, а; барабанного — на рис. 15.4, б; с приваренными полувалами — на рис. 15.4, в.

На рис. 15.5 показана схема расчета роторов с одним диском, подверженных нагрузке от центробежных сил, диск

разделяется на три части: полый цилиндр 2, внутренний диск 1, наружный диск 3.

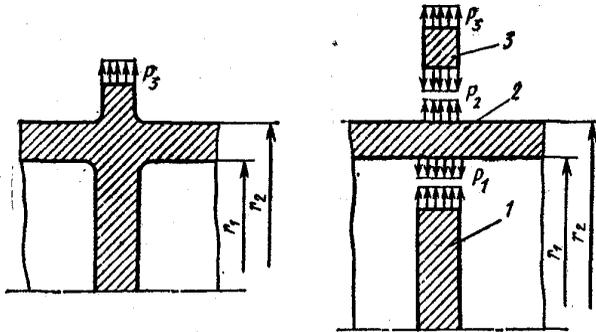


Рис. 15.5. Расчетная схема ротора

Нагрузка от лопаток на внешний диск обозначается P_3 , усилие между наружным диском и между цилиндром и внутренним диском — P_2 . Представленная на рис. 15.5 система имеет две степени статической неопределимости. Ее решение базируется на двух уравнениях деформации. Введем обозначения: $u_{\text{диск1}}$ — радиальное перемещение наружной поверхности внутреннего диска от нагрузки P_1 , центробежных нагрузок и неравномерной температуры; $u_{\text{цил1}}$ — радиальное перемещение внутренней поверхности цилиндра на участке сопряжения с диском от нагрузок P_1 и P_2 , центробежной силы, неравномерной температуры; $u_{\text{диск2}}$ — радиальное перемещение внутренней поверхности наружного диска от указанных нагрузок и температуры.

Условия деформации

$$u_{\text{диск1}} = u_{\text{цил1}}; \quad (15.6)$$

$$u_{\text{диск2}} = u_{\text{цил2}} \quad (15.7)$$

позволяют разрешить статическую неопределенность.

От всех указанных сил и температуры определяют напряжения во всех элементах ротора. Если ротор конструируется многодисковым, схема расчета остается прежней.

Сварные конструкции роторов имеют преимущества перед цельнокованными; их можно изготавливать из отдельных поковок относительно небольших размеров, применять разнородные металлы; для дисков — высококачественную сталь; для кольцевых частей — перлитную.

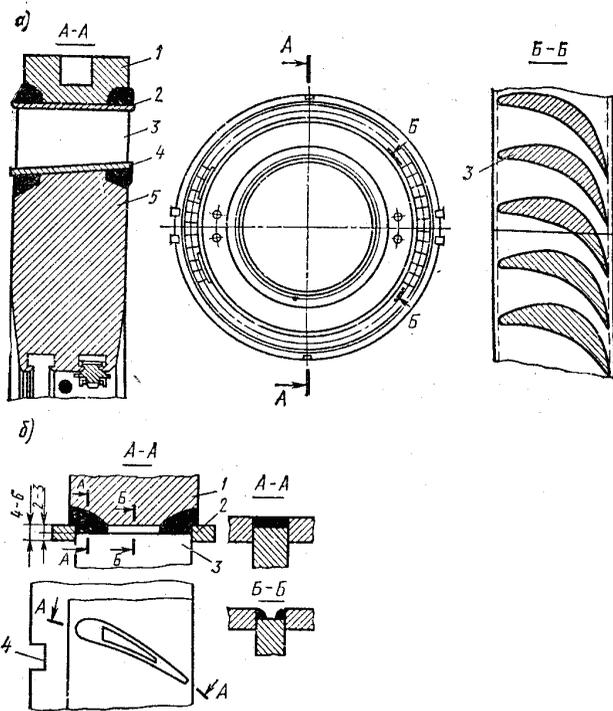


Рис. 15.6. Сварная диафрагма паровой турбины (а) и сварные соединения направляющих лопаток с бандажной лентой и ободом (б):

1 — обод; 2 — бандажная лента; 3 — лопатки; 4 шаговый паз в бандажной ленте; 5 — тело диафрагмы

В паровых турбинах (рис. 15.6, а, б) сварная диафрагма состоит из обода 1, нижней 4 и верхней 2 бандажных лент, тела диафрагмы 5, направляющих лопаток 3.

Точность изготовления диафрагм очень высокая во избежание потери мощности. Допуск на шаг лопаток составляет $\pm 0,15$ мм. Предъявляются высокие требования к погрешности угла поворота лопаток. Как правило, лопатки устанавливаются в пазы бандажных лент с углублением 2...3 мм и привариваются к ним угловыми швами.

Сварные конструкции применяются широко также в гидромашиностроении при изготовлении рабочих колес

радиально-осевых и ковшовых турбин, лопастей рабочих колес, спиральных камер, при изготовлении секторов и сварных лопаток направляющих аппаратов.

Установление методов расчета на усталостную прочность деталей машин зависит от ряда факторов: характера работы, материала, масштабного фактора обработки поверхности детали.

15.4. Надежность деталей машин

Детали машин являются составной частью машины. Основное современное требование к машине — надежность ее работы при эксплуатации.

Надежность базируется на доброкачественном материале, передовых технологических методах обработки, методах защиты изделия от коррозии, эрозии, на неразрушающем контроле качества.

Эффективны бислойные материалы; корпусные стали обыкновенного качества, плакированные аустенитом; низколегированные стали с введением в них мягких слоев, тормозящих развитие случайно образовавшихся трещин, в частности при плакировании взрывом. Целесообразен поверхностный наклеп, повышающий предел текучести, использование квазислойных материалов, обладающих промежуточными свойствами между монолитными и составными.

Большую роль играют в деталях машин композитные материалы, состоящие из полимерной матрицы с укреплением ее углеродистыми и стеклянными волокнами, или алюминиевые — с введением в нее металлических волокон. Композитные материалы приносят большую пользу в отношении борьбы с эффектом вибрации, а также в робототехнике.

Повышение надежности машин достигается применением методов оптимального проектирования на базе САПР.

Создаются методы оценки опасности напряженных состояний на разных стадиях на основе акустической эмиссии. Используются вероятностные методы расчета надежности и долговечности.

Обеспечение повышения надежности и одновременно качества достигается тщательно проработанным проектированием, осуществляемым с помощью вычислительных машин.

Задача решается составлением нескольких вариантов с учетом, как правило, нескольких параметров (критериев) качества.

Если количество критериев велико, то отыскание в проектировании оптимального решения для проектируемого объекта или даже детали не автоматизированными методами становится весьма затруднительным.

Решение задачи об оптимизации конструкции осложняется тем, что улучшение одних критериев вызывает ухудшение других. Например, улучшение критерия уменьшения массы конструкции почти всегда сопровождается ухудшением критерия повышения ее жесткости, и количество таких комбинаций, возможных сочетаний критериев, улучшающих и ухудшающих качество, растет интенсивно с увеличением их числа.

Использование ЭВМ позволяет учитывать влияние большого количества критериев на качество и надежность согласно требованиям условий эксплуатации при наличии их возможных противоречий. ЭВМ открывает возможность нахождения главных параметров, обнаружить несущественное влияние других и, наконец, сформулировать интегральный обобщающий критерий, определяющий возможный оптимум объекта.

Особо следует всесторонне повышать надежность машин, работающих в условиях переменных, низко- и высокочастотных нагрузений, а также при ударах, нередко являющихся источником первичных трещин.

В настоящее время правильное решение задачи надежности получается рациональным выбором материалов — сталей, цветных сплавов, неметаллических материалов, например, пластмасс, непосредственно удовлетворяющих главным требованиям обеспечения надежной работы конструкции при непрерывном контроле качества в условиях эксплуатации.

Большое влияние на надежную работу в эксплуатации оказывает микрогеометрия поверхности материалов, в особенности при необходимости борьбы с износом. С этой целью следует предусматривать операции повышения сопротивляемости ему путем анодирования, лазерного облучения, напыления и т. д.

Контрольные вопросы:

1. Какие детали в автомобиле изготавливаются сварными?

2. Какие коэффициенты запаса прочности принимают в узлах турбин?
3. В какой форме применяются сварные конструкции в гидромашиностроении?
4. Что такое надежность машин?
5. Какую роль играют в надежности материалы?
6. Какую роль при проектировании деталей машин играет ЭВМ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Абралов М.А., Абралов М.М. Пайвандлаш иши асослари. – Ташкент: Талкин, 2004.
2. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. – М.: Машиностроение, 1981
3. Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности. – М.: Машиностроение, 1996
4. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. – Киев: Наукова думка. 1981
5. Клыков Н.А, Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. – М.: Машиностроение. 1984
6. Куркин С. А., Николаев Г. А. Сварные конструкции: Технология изготовления, механизация, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве. – М.: Высшая школа, 1991
7. Николаев А.А. Электрогазосварщик. – Ростов на Дону: Феникс, 2000
8. Николаев Г.А. Винокуров В.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование. – М.: Высшая школа.1990
9. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. – М.: Машиностроение. 1978- 1979
10. Сварка и резка в промышленном строительстве. /Б.Д. Малышев, А.И. Акулов, Е.К. Алексеев и др.; Под ред. Б.Д. Малышева. – М.: Стройиздат, 1989
11. Сварка и резка материалов: Учеб. пособие/ М.Д. Банов, Ю.В. Казаков, М.Г. Козулин и др.; Под ред. Ю.В. Казакова. – М.: Издательский центр «Академия», 2001
12. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. II. Технология и оборудование. Справ. изд./Под. ред. В.М. Ямпольского. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998

Содержание

Введение	3
Лекция № 1. Материалы сварных конструкций	
1.1. Стали.....	4
1.2. Цветные металлы и сплавы.....	6
1.3. Сортамент.....	9
Лекция № 2. Сведения из строительной механики	11
2.1. Понятие о фермах.....	11
2.2. Классификация ферм.....	14
2.3. Определение усилия стержней фермы аналитическим методом.....	15
2.4. Перемещения ферм.....	17
2.5. Определение расчетных усилий в балках методом линии влияния.....	18
2.6. Определение усилий стержней ферм при нахождении груза на поясе.....	24
Лекция № 3. Сварные балки	25
3.1. Эволюция конструктивных форм балок.....	25
3.2. Централизованное изготовление сварных балок.....	27
3.3. Расчет жесткости и прочности балок (подбор сечений)...	29
Лекция № 4. Сварные балки	35
4.1. Общая устойчивость.....	35
4.2. Местная устойчивость.....	37
4.3. Расчет балок с учетом пластических деформации.....	39
4.4. Работа балок на кручение.....	41
4.5. Сварные соединения.....	42
Лекция № 5. Сварные балки	46
5.1. Стыки балок.....	46
5.2. Применение штампованных и гнутых профилей.....	47
5.3. Балки из алюминиевых сплавов.....	48
5.4. Опорные части балок.....	49
5.5. Пути повышения усталостной прочности балок.....	50
Лекция № 6. Сварные стойки	53
6.1. Типы поперечных сечений стоек.....	53
6.2 Прочность и устойчивость стоек со сплошными поперечными сечениями при центральном приложении усилий....	54

6.3. Прочность и устойчивость стоек при эксцентрично приложенной силе.....	56
6.4. Расчет устойчивости стойки, имеющей поперечное сечение со свободной осью.....	58
Лекция № 7. Сварные стойки.....	60
7.1. Соединительные элементы стоек.....	60
7.2. Стыки стоек.....	64
7.3. Базы и оголовки стоек.....	65
7.4. Примеры конструкций стоек.....	
Лекция № 8. Сопряжении элементов.....	67
8.1. Типы сопряжений.....	67
8.2. Расчет прочности по способу расчленения на составляющие.....	72
8.3. Расчет прочности по способу полярного момента инерции.....	73
8.4. Расчет прочности по способу осевого момента инерции.....	74
Лекция № 9. Сопряжении элементов.....	76
9.1. Сопряжения балок различных профилей.....	76
9.2. Сопряжения балок между собой с дополнительными усилениями.....	79
9.3. Сопряжения балок со стойками.....	81
9.4. Точечные соединения, работающие на изгиб.....	82
Лекция № 10. Сварные фермы.....	84
10.1. Типы ферм.....	84
10.2. Определение нагрузок и усилия стержней.....	86
10.3. Поперечные сечения стержней.....	87
10.4. Узлы ферм.....	92
10.5. Специальные конструкции ферм.....	95
Лекция № 11. Сварные фермы.....	99
11.1. Стыковые соединения поясов.....	99
11.2. Разновидности покрытий.....	100
11.3. Применение алюминиевых сплавов в сварных конструкциях ферм.....	102
11.4. Применение пайки.....	103
11.5. Применение предварительно напряженных элементов... ..	104

Лекция № 12. Сварные листовые конструкции	107
12.1. Виды листовых конструкций.....	107
12.2. Вертикальные цилиндрические резервуары с плоскими днищами.....	107
12.3. Цистерны.....	114
12.4. Газгольдеры и сферические резервуары.....	116
12.5. Применение специальных сплавов для изготовления резервуаров и цистерн.....	118
Лекция № 13. Сварные листовые конструкции	120
13.1. Тонкостенные сосуды.....	120
13.2. Трубы и трубопроводы.....	122
13.3. Достижения в строительстве оболочковых конструкции.....	127
13.4. Барабаны котлов.....	128
13.5. Коррозия оболочковых конструкций.....	130
Лекция № 14. Сварные детали машин	132
14.1. Эффективность использования сварки в деталях машин.....	132
14.2. Проектирование деталей машин.....	134
14.3. Барабаны.....	139
14.4. Корпуса редукторов.....	143
14.5. Шестерни и шкивы.....	145
Лекция № 15. Сварные детали машин	148
15.1. Сварные рамы.....	148
15.2. Сварные детали автомобилей.....	150
15.3. Сварные детали турбин.....	151
15.4. Надежность деталей машин.....	155
Литература	157

Редактор Ахметжанова Г.М.