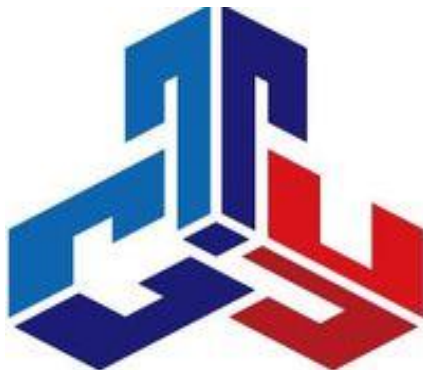


СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**ОСНОВЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рязань 2018

УДК 624.014
ББК 38.54 К
622

Основы металлических конструкций: Учеб. пособие.

Основы металлических конструкций: Учеб. пособие. /
сост. Паршков А.В., Фроловский М.Ю
Совр. техн. универ-т. – Рязань, 2018. – 59 с. – 50 экз.

В учебном пособии изложены общие положения и основы проектирования строительных металлических конструкций (МК).

Рассмотрены критерии экономичности, примеры эффективных конструкций производственных и большепролетных зданий. В приложении сделана постановка задачи по выбору экономичного варианта несущих МК на основе критериев массы МК и стоимости "в деле".

Рецензент: к.т.н., доцент В.Г. Иевенко

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета.*

УДК 624.014
ББК 38.54 К
622

© А.В.Паршков, М.Ю. Фроловский
© Современный технический университет, 2018

Оглавление

Введение	4
Условные обозначения	5
Глава 1. Основы металлических конструкций	6
1.1. Понятие о металлоконструкциях.....	6
1.2. Область применения МК.....*	6
1.3. Материалы для МК.....	7
1.4. Выбор стали для МК.....	10
1.5. Сортамент.....	10
1.6. Соединения МК.....	13
1.6.1. Сварные соединения.....	13
1.6.2. Болтовые соединения.....	16
1.7. Критерии экономичности. Факторы, влияющие на экономичность МК... 18	
1.7.1. Критерий металлоемкости.....	19
1.7.2. Критерий стоимости.....	22
Глава 2. Элементы металлических конструкций	29
2.1. Балки.....	29
2.1.1. Классификация балок.....	29
2.1.2. Особенности расчета прокатных балок.....	32
2.1.3. Особенности расчета составных сварных балок.....	33
2.2. Колонны.....	38
2.2.1. Классификация колонн.....	38
2.2.2. Особенности расчета колонн.....	38
2.3. Фермы.....	43
2.3.1. Классификация ферм.....	43
2.3.2. Особенности расчета ферм.....	49
Глава 3. Каркасы зданий	50
3.1. Состав каркаса. Типы поперечных рам.....	50
3.2. Конструктивные особенности каркасов	54
3.3. Пути повышения экономичности каркасов.....	58
Глава 4. Конструкции большепролетных покрытий	61
4.1. Область применения и особенности	61
4.2. Основные типы несущих конструкций.....	62
4.2.1. Балочные большепролетные покрытия.....	62
4.2.2. Рамные большепролетные покрытия.....	64
4.2.3. Консольные большепролетные покрытия.....	65
4.2.4. Арочные покрытия.....	68
4.2.5. Висячие системы.....	70
4.2.6 Купольные покрытия.....	74
Рекомендуемая литература	79
Приложение	80

Один из основных принципов проектирования строительных конструкций - экономическая целесообразность принимаемых решений. Строительные металлические конструкции должны быть экономичными по расходу и стоимости материала, а также трудоемкости изготовления и монтажа. В тоже время металлоконструкции должны быть прочными и долговечными. Примирить эти противоречивые требования - задача проектировщика конструктора. Такая задача достаточно точно решается путем сравнения вариантов и выбора наиболее оптимального по заданному экономическому критерию.

На 2, 3 курсах студенты специальности 060800 "Экономика и управление в строительстве" изучают курс "Строительные конструкции", в том числе раздел "Металлические конструкции".

В процессе изучения курса приобретаются определенные базовые знания о металлических конструкциях, критериях экономичности МК, факторах, влияющих на экономичность металлоконструкций, в основном на стадии проектирования. В пособии рассмотрены МК как в виде отдельных элементов (балок, колонн, ферм), так и в составе каркасов зданий (одноэтажные производственные и большепролетные каркасы). Изучение данного материала предполагает наличие у студента знаний по курсу "Строительная механика". В приложении сделана постановка задач, возникающих при выполнении индивидуальных работ по МК, для студентов специальности 060800 дневной формы обучения. Пособие может быть использовано при выполнении контрольной работы по МК студентами специальности 060800 заочной формы обучения.

Текст учебного пособия написан к.т.н., доцентом А.А. Кользеевым, графическая часть выполнена к.т.н., и.о. доцента К.А. Шафраем. Авторы выражают глубокую благодарность д.т.н., профессору В.С. Казарновскому и к.т.н., доценту Б.Н. Васюте, принявшим участие в рецензировании учебного пособия, а также к.т.н., доценту В.М. Добрачеву за ряд полезных советов.

Условные обозначения

A	- площадь поперечного сечения элемента конструкции;
$J_x, J_y, W_x,$	- моменты инерции сечения относительно главных осей;
W_y	- моменты сопротивления сечения;
i_x, i_y	- радиусы инерции;
h	- высота сечения;
b	- ширина сечения;
t	- толщина элемента;
M, N	- изгибающий момент и продольная сила;
Q	- поперечная сила;
R_y	- расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию и изгибу по пределу текучести;
R_s	- расчетное сопротивление стали срезу ($R_s = 0.58 \cdot R_y$);
a	- нормальное напряжение;
τ	- касательное напряжение;
E	- модуль упругости (для стали $E=2,0610^5$ МПа);
ℓ	- длина, пролет элемента (стержня, балки);
ℓ_{Φ}	- расчетная длина стержня (расчетный пролет балки);
γ_c	- коэффициент продольного изгиба; -
L	коэффициент условий работы;
	- гибкость стержня ($\lambda = \ell_{ef} / i$);
	- объемная масса (плотность) материала.

Глава 1. Основы металлических конструкций

1.1. Понятие о металлоконструкциях

Строительная конструкция - это инженерная система, существующая самостоятельно или входящая в состав сооружения и предназначенная для восприятия нагрузок, действующих на неё. Примерами конструкций являются колонны, балки, связи, стеновые панели.

В современном строительстве применяются различные материалы для конструкций: камень природный (гранит, мрамор) и искусственный (кирпич, бетон, сибит), дерево, пластмассы, железобетон и металлы (сталь, сплавы алюминия). Возможно использование комбинированных конструкций: деревометаллических, сталебетонных и других.

Строительные конструкции в зависимости от вида материала имеют свои рациональные области применения с учетом их достоинств и недостатков. Выбор наиболее эффективной, экономической конструкции осуществляется на основе принятого критерия экономичности (оптимальности) путем сравнения вариантов.

Под термином "металлические конструкции" (МК) будем подразумевать конструкции (балки, фермы, колонны и др.), из которых состоят каркасы зданий и сооружений. Среди этих конструкций можно выделить несущие, которые воспринимают нагрузки, действующие на каркас. Сечения их элементов определяются расчетом методами строительной механики (раздел "Соппротивление материалов"). Кроме несущих, есть ограждающие металлические конструкции (стеновые панели, кровельные плиты), изолирующие внутренние помещения каркаса от атмосферных воздействий (снег, ветер, низкие температуры). Существуют металлоконструкции, совмещающие функции несущих и ограждающих.

1.2. Область применения МК

Область применения строительных МК разнообразна. Наибольшая доля металлоконструкций (более 50% [1, 3]) приходится на каркасы зданий: производственных (заводы, фабрики), многоэтажных, в том числе общественных и жилых, большепролетных (ангары для самолетов, доки для кораблей) и, наконец, уникальных (дворцы спорта, велотреки, выставочные павильоны). Около 14% МК используется в листовых конструкциях - резервуарах для хранения горючего (бензин, нефть), бункерах и силосах для хранения сыпучих материалов (цемент, зерно), трубопроводах большого диаметра для транспортировки жидких и газообразных веществ (нефти, газа). До 15% строительных МК при

меняется в высотных сооружениях (телевизионные башни, радиомачты, опоры линий электропередач).

Ограждающие конструкции (плиты покрытия, стеновые панели, настилы) составляют до 14% [3]. Оставшиеся проценты приходятся на специальные сооружения: радиотелескопы, морские платформы для добычи нефти и газа со дна моря или океана и др.

1.3. Материалы для МК

В настоящее время для строительных металлоконструкций используются стали и сплавы алюминия. Перспективными являются сплавы титана. Каковы достоинства и недостатки конструкций из этих материалов?

Основные достоинства:

1. Высокая надежность в работе вследствие однородной структуры металла. Металлические конструкции хорошо работают не только на статические, но и динамические, в том числе сейсмические нагрузки.
2. Высокая и одинаковая прочность при работе на растяжение, сжатие и изгиб. Для сравнения - стальные МК имеют прочность $R_y = 230...330$ МПа, из сплавов алюминия - 180 МПа, бетон

марки 400 - 25 МПа (при сжатии; на растяжение бетон не работает), кирпич марки 100 - 2,5 МПа (при сжатии).

3. Относительная легкость по показателю $c = \gamma / R_y$. Для стальных конструкций $c = (2...3) \cdot 10^{-4} 1/м$, бетонных - $c = 9 - 10 \cdot 10^{-4} 1/м$, кирпичных - $c = 52 \cdot 10^{-4} 1/м$, деревянных - $c = 4 \cdot 10^{-4} 1/м$.

4. Непроницаемость для жидкостей и газов вследствие высокой плотности (для стали $\gamma = 7,85$ т/м³, для сплавов алюминия $\gamma = 2,75$ т/м³). Это достоинство особенно важно для листовых конструкций.

5. Высокая индустриальность. Металлоконструкции изготавливают на специализированных заводах, а на площадке выполняется только монтаж. Это повышает качество и сокращает сроки введения конструкций в эксплуатацию.
6. Эстетичность (красота) объектов с применением металлоконструкций.

В качестве примеров можно привести большепролетные конструкции спортивных сооружений для Олимпиады-80 в Москве: крытый велотрек в Крылатском, крытый стадион и плавательный бассейн на про

спекте Мира. В Новосибирске красивые здания с применением МК -Цирк, Ледовый дворец спорта "Сибирь".

7. Сплавы алюминия и титана являются легкими и обладают большой долговечностью. Недостатков у металлоконструкций значительно меньше:

1. Низкая коррозионная стойкость стали, особенно в агрессивной среде.

В настоящее время этот недостаток устраняется нанесением защитного лакокрасочного покрытия. Конструкции из сплавов алюминия обладают высокой коррозионной стойкостью благодаря защитной окисной пленке.

2. Малая огнестойкость. Сталь при температуре 600°C (при пожаре), а сплавы алюминия уже при 300°C полностью теряют прочность, и конструкции разрушаются. Этот недостаток, при необходимости, устраняется путем создания защитного покрытия МК из огнеупорных материалов.

В современных условиях более 90 % строительных металлоконструкций изготавливают из стали. Сплавы алюминия являются очень дорогими, а сплавы титана - стратегический материал, используемый в космической и военной технике. Поэтому в данном пособии внимание будет уделено стальным конструкциям, а под термином "металлические конструкции" будут подразумеваться стальные.

Какие стали используются для строительных МК? Во-первых, сталь - это сплав железа с углеродом и некоторыми добавками. В строительных сталях содержание углерода не должно превышать 0,2 %. При большем содержании углерода хотя и повышается прочность, но снижается пластичность, и сталь становится хрупкой как стекло (это опасно для МК, работающих при низких температурах и на динамические нагрузки). Кроме того, ухудшается свариваемость стали, в то время как сварка - это основной вид соединений для МК. Все стали для строительных МК делятся на 3 группы: малоуглеродистые стали обычной прочности; стали повышенной прочности; высокопрочные стали. Стали обычной прочности в зависимости от степени раскисления могут быть спокойными, полуспокойными и кипящими. Термин "раскисление" связан со способом изготовления стали. Известно, что при выплавке сталь засорена различными газами: азотом, кислородом, водородом. Если эти газы химически не связать в трудно растворимые соединения, то полученная сталь будет плохого качества: неоднородной

по структуре, склонной к опасному хрупкому разрушению при низких температурах. Такая сталь при разливке в специальные металлургические формы "кипит" (бурлит) из-за выделения газов и называется "кипящей".

Если в сталь при выплавке ввести "раскисляющие" добавки - кремний, марганец или алюминий, которые связывают газы, то сталь получается однородной, хорошего качества. При разливке в формы она не бурлит и ее называют "спокойной". Бывают и "полуспокойные" стали, если раскислителя ввести половину нормы. Понятно, что спокойная сталь является более дорогой, чем кипящая, за счет стоимости добавок.

В действующих нормах (ГОСТ 27772-88) кипящая сталь обозначается С235, где буква "С" - строительная сталь, а 235 - это предел текучести стали (понятие, вводимое в курсе "Строительная механика") в МПа. Полуспокойная сталь - С245, спокойные стали - С255, С275 и С285.

Спокойные стали рекомендуется использовать в несущих конструкциях, работающих как на статические, так и на динамические нагрузки в определенных температурно-климатических условиях [6], кипящие - для второстепенных, малонагруженных МК. Экономисту важно помнить, что более прочная спокойная сталь обеспечивает экономию материала, и в тоже время она является и более дорогой. Окончательный выбор стали - с учетом требований норм [6] и на основе сравнения вариантов.

Все стали повышенной и высокой прочности спокойные. Увеличение прочности достигается легированием (введением в структуру стали при её выплавке легирующих добавок) и термической обработкой (например, закалкой).

В строительных сталях в качестве добавок обычно используется марганец (повышает и прочность и пластичность стали), кремний (повышает прочность, но снижает стойкость к коррозии), медь (повышает прочность, и коррозионную стойкость) и некоторые другие. Содержание легирующих добавок не более 1-2%, то есть все строительные стали низколегированные. Стали повышенной и особенно высокой прочности очень дорогие и должны применяться при экономическом обосновании. Нормы [6] рекомендуют использовать стали повышенной прочности (С345, С375) для наиболее ответственных несущих конструкций, работающих в тяжелых условиях (низкая температура эксплуатации, агрессивная среда, динамическое нагружение). Высокопрочные стали (С390, С440, С590) в связи с их высокой стоимостью применяются редко и обычно в качестве стальных канатов и тросов.

1.4. Выбор стали для МК

В действующих нормах [6] все строительные металлоконструкции разделены на 4 группы.

В первую группу входят сварные конструкции, работающие в особо тяжелых условиях (динамическая или подвижная циклическая нагрузка). Примером таких конструкций являются подкрановые балки для мостовых кранов производственных зданий. В зависимости от расчетной низкой температуры эксплуатации для них рекомендуются стали обычной прочности С255, С285, либо повышенной прочности С345, С375. При определенных условиях [6] возможно использование даже высокопрочных сталей С390 и С440.

Ко второй группе относятся сварные конструкции, работающие на статическую нагрузку при наличии растягивающих напряжений. Это - фермы, балки покрытий и перекрытий. Для таких МК нормы разрешают использовать все стали обычной прочности, кроме кипящей С235, и стали повышенной прочности.

В третью группу входят сварные конструкции, работающие на сжимающую статическую нагрузку. Это все разновидности колонн. Нормы допускают использование сталей обычной и повышенной прочности (кипящая сталь С235 - только для конструкций, находящихся в отапливаемом помещении).

И, наконец, четвертая группа - это вспомогательные и второстепенные малонагруженные конструкции: связи, прокатные балки, лестницы. При расчетной температуре не ниже -40°C необходимо использовать наиболее дешевую кипящую сталь С235, а при более низких температурах спокойную или полуспокойную сталь С245...С285. Использование сталей повышенной прочности для МК четвертой группы экономически нецелесообразно.

1.5. Сортамент

Сортамент - это научно обоснованный перечень металлических профилей с указанием их формы, размеров и характеристик. Наиболее широко применяются прокатные и гнутые профили. Прокатный металл делится на листовый и фасонный - уголки, швеллеры, двутавры, тавры и трубы. Гнутые профили - уголки, швеллеры и "Z" - образные профили.

Листовая сталь (рис. 1.1а) делится на толстолистовую, тонколистовую и универсальную. Толстолистовая (толщина от 4 до 160 мм) используется в листовых конструкциях, а также в качестве элементов составных конструкций (поояса, стенки двутавровых балок и колонн). Тонколистовая сталь (толщина 0,5...4 мм) применяется для изготовления

гнутых профилей и ограждающих конструкций. Лист универсальной стали (толщина 6...40 мм) имеет 4 ровных грани. При использовании этой стали в составных балках и колоннах снижается трудоемкость их изготовления, т.к. не требуется резать и обрабатывать кромки.

Угловая прокатная сталь бывает равнополочной и неравнополочной (рис. 1.1б, в). Размеры полок уголков варьируются от 50 до 250 мм, толщины от 5 до 30 мм. Из угловой стали чаще проектируют решетчатые конструкции и сооружения: фермы, арки, высотные башни и мачты.

Прокатные швеллеры (рис. 1.1 г) выпускают от №.5 до № 40, причем номер швеллера соответствует его высоте в сантиметрах. В строительстве швеллер - это готовая балка (прогон покрытия), особенно выгодная в покрытиях зданий с большим уклоном. Швеллеры - также элементы сечений составных балок, колонн, связей.

Двутавровые профили бывают с уклоном внутренних граней полок (рис. 1.1д) и с параллельными гранями (рис. 1.1е). Первые чаще используются в качестве балок. Такие двутавры (от № 10 до № 60) позволяют перекрывать пролеты до 4ч-6 м.

Двутавры с параллельными гранями полок выпускают трех видов: балочные, широкополочные и колонные. Высота сечения балочных и широкополочных профилей достигает 1 м. Такими мощными балками можно перекрыть пролеты до 10м. Широкополочные и колонные двутавры - это также колонны с невысокой трудоемкостью изготовления.

Разрезкой двутавров можно получить тавровые профили (рис. 1.1 ж), которые используются в качестве поясов решетчатых конструкций: ферм, рам, арок.

Трубчатые профили бывают круглые, прямоугольные и гнутосварные. Круглые трубы (рис. 1.1з), в свою очередь, делятся на горячеде-формированные (бесшовные) и сварные. Труба - идеальный профиль для колонн и сжатых стержней конструкций. Сварные трубы больших диаметров ($D > 500$ мм) используют для транспортировки нефти и газа. Металл в поперечном сечении трубы равноудален от центра тяжести, что обеспечивает большие моменты и радиусы инерции в главных плоскостях. Кроме того, жесткость при кручении у трубы в десятки и сотни раз выше чем у любого открытого профиля (двутавр, швеллер). Использование круглых труб, например, в фермах обеспечивает экономию стали до 30 % [1].

Труба также обладает высокой коррозионной стойкостью при условии герметизации внутренней полости и многими другими достоинствами [1, 3]. К недостаткам круглой трубы можно отнести её высокую стоимость в сравнении с другими профилями.

спекте Мира. В Новосибирске красивые здания с применением МК -Цирк, Ледовый дворец спорта "Сибирь".

7. Сплавы алюминия и титана являются легкими и обладают большой долговечностью. Недостатков у металлоконструкций значительно меньше:

1. Низкая коррозионная стойкость стали, особенно в агрессивной среде.

В настоящее время этот недостаток устраняется нанесением защитного лакокрасочного покрытия. Конструкции из сплавов алюминия обладают высокой коррозионной стойкостью благодаря защитной окисной пленке.

2. Малая огнестойкость. Сталь при температуре 600°C (при пожаре), а сплавы алюминия уже при 300°C полностью теряют прочность, и конструкции разрушаются. Этот недостаток, при необходимости, устраняется путем создания защитного покрытия МК из огнеупорных материалов.

В современных условиях более 90 % строительных металлоконструкций изготавливают из стали. Сплавы алюминия являются очень дорогими, а сплавы титана - стратегический материал, используемый в космической и военной технике. Поэтому в данном пособии внимание будет уделено стальным конструкциям, а под термином "металлические конструкции" будут подразумеваться стальные.

Какие стали используются для строительных МК?

Во-первых, сталь - это сплав железа с углеродом и некоторыми добавками. В строительных сталях содержание углерода не должно превышать 0,2 %. При большем содержании углерода хотя и повышается прочность, но снижается пластичность, и сталь становится хрупкой как стекло (это опасно для МК, работающих при низких температурах и на динамические нагрузки). Кроме того, ухудшается свариваемость стали, в то время как сварка - это основной вид соединений для МК.

Все стали для строительных МК делятся на 3 группы:

малоуглеродистые стали обычной прочности; стали повышенной прочности; высокопрочные стали.

Стали обычной прочности в зависимости от степени раскисления могут быть спокойными, полуспокойными и кипящими. Термин "раскисление" связан со способом изготовления стали. Известно, что при выплавке сталь засорена различными газами: азотом, кислородом, водородом. Если эти газы химически не связать в трудно растворимые соединения, то полученная сталь будет плохого качества: неоднородной

по структуре, склонной к опасному хрупкому разрушению при низких температурах. Такая сталь при разливке в специальные металлургические формы "кипит" (бурлит) из-за выделения газов и называется "кипящей".

Если в сталь при выплавке ввести "раскисляющие" добавки - кремний, марганец или алюминий, которые связывают газы, то сталь получается однородной, хорошего качества. При разливке в формы она не бурлит и ее называют "спокойной". Бывают и "полуспокойные" стали, если раскислителя ввести половину нормы. Понятно, что спокойная сталь является более дорогой, чем кипящая, за счет стоимости добавок.

В действующих нормах (ГОСТ 27772-88) кипящая сталь обозначается С235, где буква "С" - строительная сталь, а 235 - это предел текучести стали (понятие, вводимое в курсе "Строительная механика") в МПа. Полуспокойная сталь - С245, спокойные стали - С255, С275 и С285.

Спокойные стали рекомендуется использовать в несущих конструкциях, работающих как на статические, так и на динамические нагрузки в определенных температурно-климатических условиях [6], кипящие - для второстепенных, малонагруженных МК. Экономисту важно помнить, что более прочная спокойная сталь обеспечивает экономии материала, и в тоже время она является и более дорогой. Окончательный выбор стали - с учетом требований норм [6] и на основе сравнения вариантов.

Все стали повышенной и высокой прочности спокойные. Увеличение прочности достигается легированием (введением в структуру стали при её выплавке легирующих добавок) и термической обработкой (например, закалкой).

В строительных сталях в качестве добавок обычно используется марганец (повышает и прочность и пластичность стали), кремний (повышает прочность, но снижает стойкость к коррозии), медь (повышает прочность, и коррозионную стойкость) и некоторые другие. Содержание легирующих добавок не более 1-2%, то есть все строительные стали низколегированные. Стали повышенной и особенно высокой прочности очень дорогие и должны применяться при экономическом обосновании. Нормы [6] рекомендуют использовать стали повышенной прочности (С345, С375) для наиболее ответственных несущих конструкций, работающих в тяжелых условиях (низкая температура эксплуатации, агрессивная среда, динамическое нагружение). Высокопрочные стали (С390, С440, С590) в связи с их высокой стоимостью применяются редко и обычно в качестве стальных канатов и тросов.

1.4. Выбор стали для МК

В действующих нормах [6] все строительные металлоконструкции разделены на 4 группы.

В первую группу входят сварные конструкции, работающие в особо тяжелых условиях (динамическая или подвижная циклическая нагрузка). Примером таких конструкций являются подкрановые балки для мостовых кранов производственных зданий. В зависимости от расчетной низкой температуры эксплуатации для них рекомендуются стали обычной прочности С255, С285, либо повышенной прочности С345, С375. При определенных условиях [6] возможно использование даже высокопрочных сталей С390 и С440.

Ко второй группе относятся сварные конструкции, работающие на статическую нагрузку при наличии растягивающих напряжений. Это - фермы, балки покрытий и перекрытий. Для таких МК нормы разрешают использовать все стали обычной прочности, кроме кипящей С235, и стали повышенной прочности.

В третью группу входят сварные конструкции, работающие на сжимающую статическую нагрузку. Это все разновидности колонн. Нормы допускают использование сталей обычной и повышенной прочности (кипящая сталь С235 - только для конструкций, находящихся в отапливаемом помещении).

И, наконец, четвертая группа - это вспомогательные и второстепенные малонагруженные конструкции: связи, прокатные балки, лестницы. При расчетной температуре не ниже -40°C необходимо использовать наиболее дешевую кипящую сталь С235, а при более низких температурах спокойную или полуспокойную сталь С245...С285. Использование сталей повышенной прочности для МК четвертой группы экономически нецелесообразно.

1.5. Сортамент

Сортамент - это научно обоснованный перечень металлических профилей с указанием их формы, размеров и характеристик. Наиболее широко применяются прокатные и гнутые профили. Прокатный металл делится на листовую и фасонный - уголки, швеллеры, двутавры, тавры и трубы. Гнутые профили - уголки, швеллеры и "Z" - образные профили.

Листовая сталь (рис. 1.1а) делится на толстолистовую, тонколистовую и универсальную. Толстолистовая (толщина от 4 до 160 мм) используется в листовых конструкциях, а также в качестве элементов составных конструкций (пояса, стенки двутавровых балок и колонн). Тонколистовая сталь (толщина 0,5...4 мм) применяется для изготовления

гнутых профилей и ограждающих конструкций. Лист универсальной стали (толщина 6...40 мм) имеет 4 ровных грани. При использовании этой стали в составных балках и колоннах снижается трудоемкость их изготовления, т.к. не требуется резать и обрабатывать кромки.

Угловая прокатная сталь бывает равнополочной и неравнополочной (рис. 1.16, в). Размеры полок уголков варьируются от 50 до 250 мм, толщины от 5 до 30 мм. Из угловой стали чаще проектируют решетчатые конструкции и сооружения: фермы, арки, высотные башни и мачты.

Прокатные швеллеры (рис. 1.1 г) выпускают от № 5 до № 40, причем номер швеллера соответствует его высоте в сантиметрах. В строительстве швеллер - это готовая балка (прогон покрытия), особенно выгодная в покрытиях зданий с большим уклоном. Швеллеры - также элементы сечений составных балок, колонн, связей.

Двутавровые профили бывают с уклоном внутренних граней полок (рис. 1.1д) и с параллельными гранями (рис. 1.1е). Первые чаще используются в качестве балок. Такие двутавры (от № 10 до № 60) позволяют перекрывать пролеты до 4-6 м.

Двутавры с параллельными гранями полок выпускают трех видов: балочные,

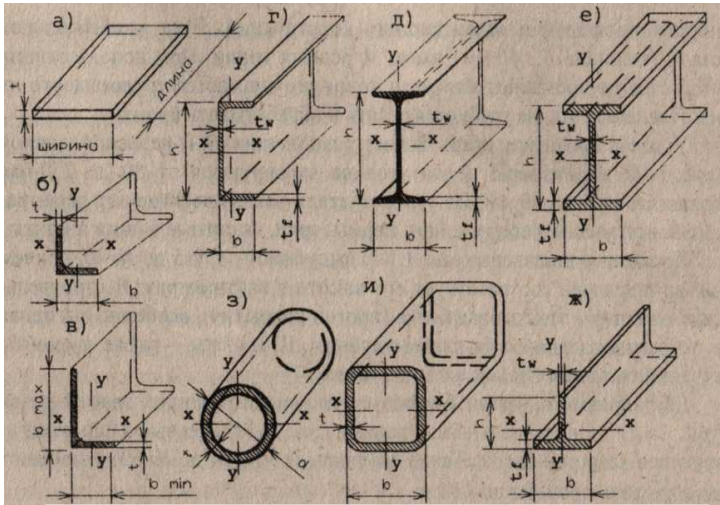


Рис. 1.1. Типы профилей:

- а - лист, б - равнополочный уголок, в - неравнополочный уголок, г - швеллер, д - двутавр с уклоном внутренних граней полок, е - двутавр с параллельными гранями полок, ж - тавр, з - круглая труба, и - гнутая квадратная труба

широкополочные и колонные. Высота сечения балочных и широкополочных профилей достигает 1 м. Такими мощными балками можно перекрыть пролеты до 10 м. Широкополочные и колонные двутавры - это также колонны с невысокой трудоемкостью изготовления.

Разрезкой двутавров можно получить тавровые профили (рис. 1.1 ж), которые используются в качестве поясов решетчатых конструкций: ферм, рам, арок.

Трубчатые профили бывают круглые, прямоугольные и гнутосварные. Круглые трубы (рис. 1Лз), в свою очередь, делятся на горяче-формированные (бесшовные) и сварные. Труба ~ идеальный профиль для колонн и сжатых стержней конструкций. Сварные трубы больших диаметров ($D > 500$ мм) используют для транспортировки нефти и газа. Металл в поперечном сечении трубы равноудален от центра тяжести, что обеспечивает большие моменты и радиусы инерции в главных плоскостях. Кроме того, жесткость при кручении у трубы в десятки и сотни раз выше чем у любого открытого профиля (двутавр, швеллер). Использование круглых труб, например, в фермах обеспечивает экономию стали до 30 % [1].

Труба также обладает высокой коррозионной стойкостью при условии герметизации внутренней полости и многими другими достоинствами [1, 3]. К недостаткам круглой трубы можно отнести её высокую стоимость в сравнении с другими профилями.

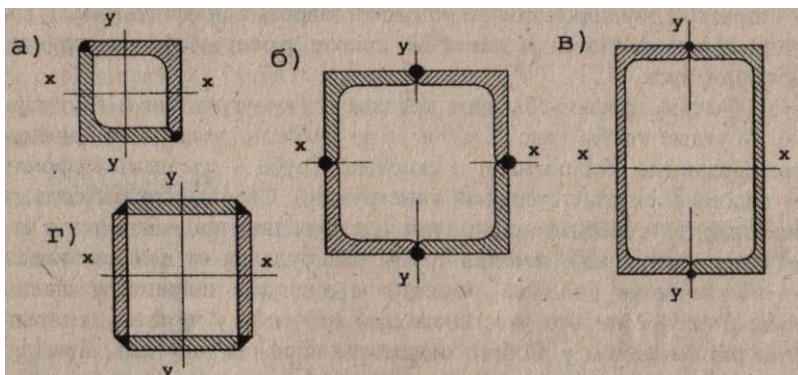


Рис. 1.2. Прямоугольные сварные трубы:

а - из двух уголков, б - из четырех уголков, в - из двух швеллеров г- из четырех листов

Прямоугольные сварные трубы изготавливают из прокатных профилей: двух или четырёх уголков, двух швеллеров, четырех листов (рис. 1.2). Прямоугольные трубы выгодно использовать в конструкциях, работающих как на сжатие (колонны), так и на изгиб (балки, фермы). Эти профили сочетают в себе достоинства круглых труб с невысокой стоимостью изготовления.

Гнутосварные трубы (рис. 1.1) выполняют из тонколистовой стали по специальной технологии. Благодаря своей тонкостенности ($t=3-8$ мм при габаритном размере h до 180 мм) они эффективны при работе на сжатие. На основе гнутосварных труб разработаны типовые решения каркасов производственных зданий. По стоимости такие трубы занимают промежуточное положение между круглыми и прямоугольными.

Гнутые профили в основном применяют в качестве прогонов, связей и в ограждающих конструкциях каркасов зданий.

Известно, что при использовании в одной конструкции, например ферме, большого количества типов или типоразмеров профилей, (в соответствии с действующими усилиями) можно добиться экономии металла, но при этом возрастает трудоемкость изготовления. Поэтому, для создания экономичной конструкции важно не только правильно выбрать тип профиля, исходя из условий его работы, но и сократить число типоразмеров до разумного предела, т.е. выполнить оптимальную по массе унификацию.

1.6. Соединения МК

Соединения металлоконструкций выполняются как в условиях специализированных заводов, так и на монтажной площадке. Соответственно, они называются заводскими или монтажными. Любое соединение должно быть надежным в работе, технологичным при изготовлении и экономичным, а монтажное, кроме того, удобным и безопасным (при работе на высоте).

Основной вид соединений МК - сварные (более 90 %). При монтаже часто используют болтовые соединения. Для ответственных конструкций, работающих в тяжелых условиях, могут применяться заклёпочные соединения. В конструкциях из тонколистовой стали ($t = 0,5-1$ мм) возможны паяные соединения. В данном учебном пособии рассмотрим наиболее распространенные сварные и болтовые соединения.

1.6.1. Сварные соединения

В строительстве, в основном, применяется электродуговая сварка, которая бывает трёх видов: автоматическая, полуавтоматическая и ручная. Первые два вида выполняются в заводских условиях с помощью

Тавровые и угловые соединения применяются в составных балках и колоннах (рис. 1.3 г, д). При этом плоскость одного элемента соединяется с торцом другого (сопряжение пояса со стенкой). Соединения надёжны в работе, их можно выполнять автоматической сваркой.

Комбинированные соединения - стыковые с накладками применяются в случае, если прочности стыкового соединения недостаточно.

1.6.2. Болтовые соединения

Достоинства болтовых соединений - простота и надёжность в работе, незначительная концентрация напряжений. К недостаткам можно отнести повышенную металлоёмкость и ослабление элементов отверстиями под болты. Болтовые соединения работают в основном на сдвиг, реже ~ на растяжение.

Для болтовых соединений МК применяются несколько типов болтов:

- грубой и нормальной точности;
- повышенной точности;
- высокопрочные.

Болты грубой и нормальной точности используются при монтаже, изготавливаются из стали обычной прочности и ставятся в отверстия диаметром на 3-4 мм больше диаметра болта. Термин "грубая" или "нормальная" точность связан с допусками на изготовление болта. Соединение простое, но деформативное.

Болты повышенной точности при изготовлении обтачиваются и ставятся в отверстия, диаметр которых всего на 0,3 мм больше диаметра болта. Соединение плотное, но сложное при монтаже.

Высокопрочные-, болты изготавливают из легированных сталей, ставят в отверстия диаметром на 3.. 4 мм больше диаметра болта и затягивают специальным "тарировочным" ключом, позволяющим контролировать силу натяжения. Сдвигающая сила в этом случае воспринимается за счет сил трения, возникающих между соединяющими плоскостями. Соединение простое и надёжное, используется в несущих конструкциях для соединения элементов (например, поясов и стенки балки), а также в монтажных стыках.

Болтовые соединения применяются как для листового, так и профильного металла. Соединение выполняется либо внахлестку, либо с накладками. Нахлесточное соединение возможно для листового проката (рис. 1.5). Расположение болтов рядовое или шахматное (рис. 1.5). Количество болтов определяется расчетом. Расстояние между осями болтов назначаются с учетом минимально необходимых по [6].

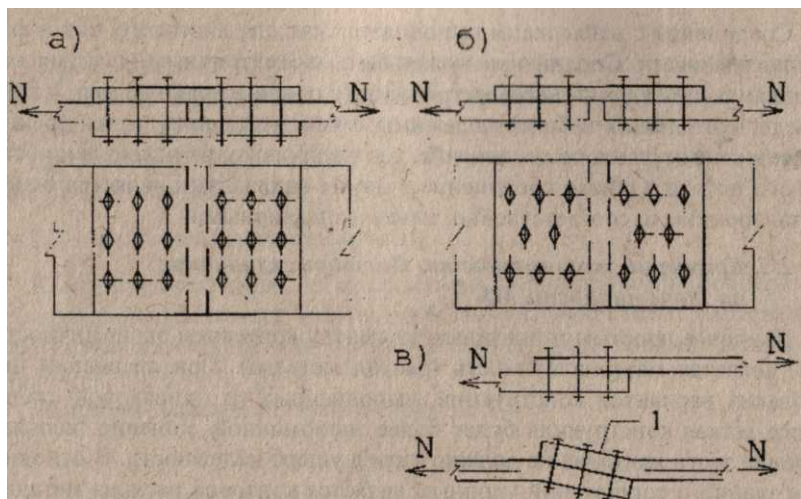
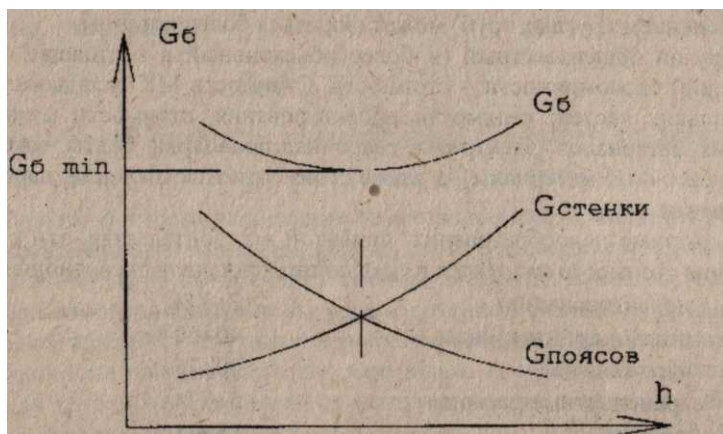


Рис. 1.5. Болтовые соединения:
 а - с двумя накладками (рядовое расположение болтов), б - с одной накладкой (шахматное расположение болтов), в - внахлестку (1 - в деформированном состоянии)



Бюпт

Рис. 1.6. График зависимости массы балки от высоты сечения

Соединение с накладками выполняется как для листового, так и фасонного проката. Соединение может быть симметричным (с двумя накладками, рис. 1.5 а) и несимметричным (с одной накладкой рис. 1.5 б). Предпочтительным и более надежным с конструктивной точки зрения является симметричное соединение, т.к. не происходит искривление силового потока. Однако соединение с двумя накладками является более металлоемким и, соответственно, менее экономичными.

1. 7. Критерии экономичности. Факторы, влияющие на экономичность МК

Наиболее простым и понятным инженеру критерием экономичности МК является материалоемкость (расход металла). При сравнении нескольких вариантов конструкций, выполненных из одинаковой стали, более легкая конструкция будет более экономичной. Конечно, использование этого критерия не должно идти в ущерб надежности. В отношении зданий и сооружений удобным является критерий расхода металла на единицу площади или объема ($\text{кг}/\text{м}^2$, $\text{кг}/\text{м}^3$). Критерий металлоемкости может быть использован как на стадии сравнения вариантов, так и на стадии рабочего проектирования. К сожалению, этот критерий не применим в случае, когда конструкции в разных вариантах изготовлены из разной стали, и более легкий вариант (из легированной стали или с применением круглых труб) может оказаться более дорогим.

Другой общеизвестный (и более объективный в настоящее время) критерий экономичности ~ стоимость. Стоимость МК складывается из нескольких частей: стоимости проектирования, стоимости металла и других материалов (электроды, сварочная проволока, болты, заклепки, лакокрасочные материалы), а также стоимости изготовления, перевозки и монтажа.

В системе ценообразования, принятой в строительстве, эти составляющие стоимости находятся в следующих процентных соотношениях:

- | | |
|-------------------------|------------|
| - проектирование | 2-3 %; 40- |
| - сталь и др. материалы | гБО %; |
| - изготовление | 20-25 %; |
| - транспортные расходы | 5+7 %; |
| - монтаж | 15ч-25%. |

Критерий стоимости при оценке конструкций можно использовать в виде отдельных частей, например стоимости проектирования, либо в виде комплексного показателя - стоимости "в деле", который учитывает все составные части стоимости.

Наконец, наиболее общим и объективным критерием экономичности МК являются "приведенные" затраты, которые учитывают не только стоимость смонтированных МК, но и расходы на их эксплуатацию. Рассмотрим более подробно эти критерии, а также факторы, влияющие на экономичность МК.

1.7.1. Критерий металлоемкости

Какие факторы влияют на металлоемкость конструкций? Во-первых, это применяемый металл. Используя более прочную сталь в растянутых или изгибаемых элементах, можно добиться существенной экономии стали (до 20-30% [3, 4]).

Например, масса растянутого стержня:

$$m_p = \frac{N}{R_y} \cdot \ell \cdot \gamma \cdot \psi_k$$

где ψ_k - конструктивный коэффициент, учитывающий массу дополнительных деталей, $\psi_k > 1$. Чем больше прочность металла - R_y , тем меньше масса стержня.

В тоже время в сжатых элементах прочную сталь использовать невыгодно, т.к. их масса:

$$m_c = \frac{N}{\varphi \cdot R_y} \cdot \ell \cdot \gamma \cdot \psi_k \quad (1.2)$$

Увеличение прочности компенсируется снижением коэффициента продольного изгиба $\varphi < 1$ (т.е. чем больше R_y , тем меньше φ).

Другим фактором, влияющим на металлоемкость, является рациональная компоновка элементов конструкций. В этом случае важным является выбор типа поперечного сечения элемента. Известно, что для сжатых элементов наиболее выгодным сечением является круглая труба, для изгибаемых - двутавр и коробчатое сечение. При использовании труб экономия металла достигается не только за счет рационального сечения (в трубах металл удален от центра тяжести сечения, что обеспечивает наиболее высокие радиусы инерции i_x, i_y при фиксированной площади), но и за счет эффективности узлов металлических конструкций, отсутствия дополнительных деталей.

- коэффициенты радиусов, инерции

$$\alpha = i_x / h, \beta = i_y / b;$$

- коэффициенты ядровых расстояний

$$= W_y / (A \cdot b);$$

$$\rho_x = W_x / (A \cdot h), \rho_y =$$

- удельный момент сопротивления

$$\omega = W / A^{1.5}$$

- удельный момент инерции кручения

$$\eta = J_t / A^2$$

где J_t - момент инерции сечения при кручении.

Эффективность сечения тем выше, чем больше эти показатели при прочих равных условиях.

Важным показателем эффективности сечения элемента является его относительная тонкостенность $t/h, t/b$. Чем меньше этот показатель, тем меньше расхода металла, т.е. сечение экономичнее. Нижняя граница показателя тонкостенности зависит от условий коррозионного износа и устойчивости сжатого элемента. Наиболее тонкостенной может быть круглая труба $t/D > 1/250$ (D - наружный диаметр трубы). Для сравнения в прямоугольных гнутосварных трубах $t/h > 1/40$, в сварных трубах из двух прокатных уголков $t/b > 1/17$.

При компоновке элементов конструкций также устанавливаются геометрические параметры, определяющие оптимальный расход металла. Например, в фермах - это очертание конструкции, тип решетки, длина панели поясов. В фермах больших пролетов (свыше 40 м) выгодно использовать очертание по параболе (рис. 2.13-6), которое хорошо соответствует эпюре изгибающих моментов. В фермах пролетом до 40 м выгодным по расходу металла является трапецидальное очертание (рис. 2.13-3). Но трудоемкость изготовления такой фермы значительна, т.к. различны длины элементов решетки и геометрия узлов. Поэтому в области малых и средних пролётов (до 40 м) применяются фермы с параллельными поясами (рис. 2.13-2), которые на 3..4% тяжелее трапецидальных, но более технологичны при изготовлении.

И, наконец, при компоновке элементов конструкций необходимо учитывать экономичность соединений и узловых сопряжений. Вне сомнений, сварные соединения наиболее технологичны, обеспечивают строительство простых узлов. На примере ферм - узловые сопряжения могут быть на фасонках (рис. 2.16 а, б) и бесфасоночные (рис. 2.16 в, г). Во втором случае расход металла на ферму снижается на 12.. 15 % только за счет отсутствия дополнительных деталей (фасонок, прокладок).

Глобальным фактором, влияющим на металлоемкость, является общая компоновка здания: установление генеральных размеров конструкций (пролет, высота), размещение несущих конструкций в плане (выбор

типа планировки, шага несущих **элементов**), компоновка связей, т.е. второстепенных элементов, объединяющих основные несущие. Задачи компоновки выгодно решать путем сравнения вариантов, и в то же время выбор наиболее эффективной схемы в значительной мере является результатом творческой интуиции инженера.

При компоновке здания важным является принцип концентрации материала в несущих элементах, который приводит не только к экономии массы металла, но и уменьшению трудоемкости и стоимости изготовления.

Принцип концентрации предполагает увеличение шага несущих конструкций до 12, 18, 24 м. При этом нагрузка на несущие конструкции и соответственно, их масса возрастает, но количество несущих элементов уменьшается, что в целом приводит к снижению массы каркаса здания. Известно, также, что изготовить тонну крупных элементов МК проще и дешевле, чем тонну легких.

При использовании принципа концентрации материала выгодно учитывать пространственную работу здания. Промежуточные элементы, соединяющие несущие МК, при большом шаге получаются мощными. Они снижают и перераспределяют усилия в несущих конструкциях-что также позволяет снизить массу последних.

Таким образом, для создания оптимальной по расходу металла конструкции необходимо вариантное решение ряда задач:

- выбор материала и формы поперечного сечения профилей;
- компоновка элементов конструкций;
- выбор типа узлов и соединений;
- компоновка каркаса здания (сооружения).

В настоящее время возможно решение этих задач методами математического программирования с помощью ЭВМ. Задача оптимизации заключается в составлении и минимизации целевой функции:

$$C = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = C_{\min} \quad (1.3)$$

при заданных ограничениях.

Если в качестве критерия оптимальности принята масса несущих конструкций, то целевая функция наиболее простая

$$G = \gamma \sum_{i=1}^n (A_i \cdot \ell_i) \quad (1.4)$$

где G - теоретическая масса конструкции; A_j - площадь, а J_i - длина i-го элемента.

Для учета второстепенных деталей конструкции в целевую функцию вводится конструктивный коэффициент γ :

$$G = \gamma \sum_{i=1}^n (A_i \cdot \ell_i \cdot \psi_i) \quad (1.5)$$

Приведем пример использования целевой функции.

В составных балках двутаврового сечения (рис. 2.1 б) высота может быть назначена из условия минимума массы балки. Целевая функция в этом случае:

$$G_6 = G_{\text{п}} + G_{\text{ст}} = (2 \cdot A_f \cdot \psi_f + A_w \cdot \psi_w) \cdot \ell \cdot \gamma = \left(\frac{2 \cdot 0.85 \cdot M_{\text{max}}}{h \cdot R_y} \cdot \psi_f + h \cdot t_w \cdot \psi_w \right) \cdot \ell \cdot \gamma, \quad (1.6)$$

где $G_{\text{п}}$, $G_{\text{ст}}$ - соответственно, масса поясов и стенки; A_f , A_w - площадь поясов и стенки; ψ_f , ψ_w - конструктивные коэффициенты, соответ-

$$\frac{\partial G_6}{\partial h} = 0$$

ственно, поясов и стенки, учитывающие массу дополнительных деталей (рёбра жесткости, накладки в монтажных стыках). Минимум целевой функции

$$(1.7)$$

откуда оптимальная по критерию массы высота балки:

$$h_{\text{опт}} = \kappa \cdot \sqrt{W_{\text{тр}} / t_w}, \quad (1.8)$$

где $\kappa = 1, 1.1, 1.2$ - коэффициент, зависящий от конструкции балки (сварная или клепаная, разрезная или неразрезная, см. п.2.1.1);

$W_{\text{тр}} = M_{\text{max}} / R_y$ - "требуемый" момент сопротивления балки из условия прочности;

t_w — толщина стенки, приближенно назначаемая в зависимости от

высоты балки
$$h \approx \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{10} \right) \cdot \ell$$

Графически нахождение оптимальной по расходу металла высоты представлено на рис. 1.6. Минимум функции $G_6 = f(h)$ является "размытым", и поэтому отступление от оптимального значения высоты на 10-И 5 % приводит к увеличению массы балки всего на 3-г4 %.

1.7.2. Критерий стоимости

Структура стоимости МК рассмотрена в начале главы 1.6. Наибольший "удельный вес" (до 60 %) в этой структуре имеет стоимость материалов. Из чего же складывается стоимость стального проката?

Стоимость стали должна определяться прейскурантом оптовых цен, которые составлены по видам металлопродукции на 1т теоретической

массы. Стоимость стали зависит от способа выплавки (сталь спокойная или кипящая, обычной прочности или легированная), вида и размеров профилей. Так, цена на листовую прокат зависит от толщины листа (тонколистовая сталь - более дорогая), цены на угловую сталь определяются шириной полки (более дорогой - "мелкий" уголок) и, наконец, цены на двутавры и швеллеры зависят от номера профиля. В оптовые цены также включают усреднённую стоимость перевозки металла от завода-прокатчика до ближайшей к заводу по производству металлоконструкций железнодорожной станции или пристани. Расходы по перевозке стали от станции до завода металлоконструкций включают в заготовительно-складские.

Оптовые цены на металлопрокат увеличиваются за счет дополнительных начислений:

- заготовительно-складские* расходы (разгрузка, сортировка, чистка и хранение металла);
- приплаты по договорным условиям (проведение дополнительных испытаний для уточнения механических характеристик стали, за мерность длины проката);
- увеличение массы проката в связи с отклонением её от теоретического значения (плюсовые допуски при прокатке);
- увеличение массы металла за счет отходов при изготовлении.

Привести конкретные проценты на каждый из перечисленных пунктов сейчас невозможно, т.к. цены в основном договорные и диктуются заводами-монополистами (в Западной Сибири - это Западно-Сибирский металлургический комбинат - ЗСМК, Кузнецкий металлургический комбинат - КМК и заводы металлоконструкций - ЗМК).

Оптовые цены на вспомогательные материалы для изготовления МК (электроды, сварочная проволока, болты и другие метизы) определяются прейскурантами ведомств, производящих эти изделия. Стоимость перевозки в оптовых ценах на эти материалы не учитывается и оплачивается отдельно.

Теперь, для сравнения, определим оптимальную высоту составной двутавровой балки на основе критерия стоимости металла. Целевая (Ъункция:

(1.9)

где c_f, c_w - удельная стоимость металла поясов и стенки (в р./т). $G_g = (2 \cdot A_f \cdot \psi_f \cdot c_f + A_w \cdot \psi_w \cdot c_w) \cdot l \cdot \gamma$

Заменяя значение

$$A_f = \frac{0,85 \cdot M_{\max}}{h \cdot R_y}$$

и $A_w = h \cdot t_w$ и минимизируя

функцию $\partial C_g / \partial h = 0$ получим:

$$h_{\text{опт}} = k \cdot \sqrt[3]{\lambda_w \cdot W_{\text{тр}}} \quad (1.10)$$

где $k = 0,95 \div 1,02$ - коэффициент, учитывающий особенность конструкции и работы балки;

$$\lambda_w = \lambda_w / t_w \approx h_w / t_w \quad \text{- гибкость стенки.}$$

Стоимость изготовления (заводская себестоимость) составляет до 25 % общей стоимости МС. Стоимость изготовления тесно связана с трудоемкостью. Величина трудоёмкости зависит от сложности изготовления конструкции и технологических особенностей производства (степени механизации и автоматизации ЗМК). При обработке металла на заводах металлоконструкций используется до 40 технологических операций: резка механическая или газовая, сверление, строжка, сварка и др. На долю резки и сварки приходится до 50 % от общей трудоемкости.

Установлено, что трудоемкость изготовления конструкции в функции её массы является выпуклой кривой (рис. 1.7). Угол наклона кривой зависит от степени сложности конструкции и наличия оборудования. Понятно, что упрощение конструкции и автоматизация ЗМК снижают трудоёмкость изготовления и делают эту кривую более пологой. Трудоёмкость изготовления 1 т конструкции в функции массы или пролёта (рис. 1.8) представляется убывающей кривой. Здесь наглядно проявляется принцип концентрации материала.

Таким образом, для снижения трудоемкости, а значит и стоимости изготовления, необходимо использовать, во-первых, принцип концентрации металла (при этом снижается масса конструкций), во-вторых, принцип упрощения конструктивной формы и, в третьих, совершенствовать технологию изготовления МК. Для упрощения конструкций возможно использование типизации, предполагающей уменьшение числа типов и типоразмеров элементов, что ведет к их повторяемости (серийности). На основе типизации созданы конструктивные типовые решения, типовые проекты. Некоторый перерасход металла, который может возникать при использовании типовых проектов, компенсируется снижением стоимости изготовления.

В заводскую себестоимость помимо затрат на изготовление МК входят цеховые и общезаводские расходы: ремонт оборудования, зарплата рабочих и инженерно-технического персонала, административно-управленческие расходы и многие другие. Определение трудоемкости и стоимости изготовления - сложная задача. Для ее решения удобно разделить конструкцию на основные детали, воспринимающие усилия (например, пояса и стенка балки, пояса и решетка фермы) и дополнительные. По аналогии с конструктивным коэффициентом массы можно ввести коэффициент трудоемкости технологических операций:

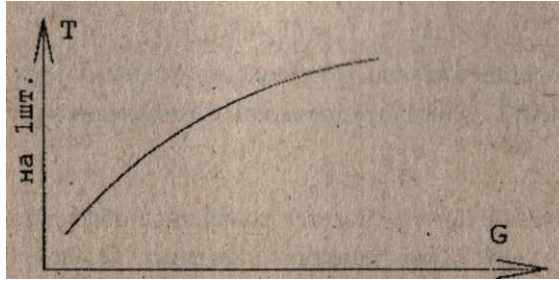


Рис. 1.7. Трудоемкость изготовления 1 шт. конструкции в функции Веса G

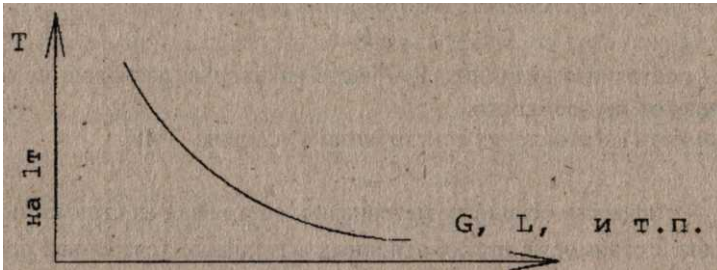


Рис. 1.8. Трудоемкость изготовления 1 т конструкций в функции основных параметров (вес, пролет и т.п.)

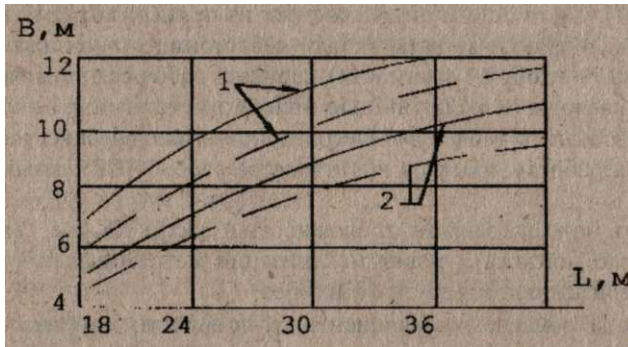


Рис. 1.9. Оптимальный шаг ферм:
 1 - при сквозных прогонах, 2 - при прокатных прогонах
 (____ по стоимости, ____ по массе)

Тавровые и угловые соединения применяются в составных балках и колоннах (рис. 1.3 г, д). При этом плоскость одного элемента соединяется с торцом другого (сопряжение пояса со стенкой). Соединения надёжны в работе, их можно выполнять автоматической сваркой.

Комбинированные соединения - стыковые с накладками применяются в случае, если прочности стыкового соединения недостаточно.

1.6.2. Болтовые соединения

Достоинства болтовых соединений - простота и надёжность в работе, незначительная концентрация напряжений. К недостаткам можно отнести повышенную металлоёмкость и ослабление элементов отверстиями под болты. Болтовые соединения работают в основном на сдвиг, реже ~ на растяжение.

Для болтовых соединений МК применяются несколько типов болтов:

- грубой и нормальной точности;
- повышенной точности;
- высокопрочные.

Болты грубой и нормальной точности используются при монтаже, изготавливаются из стали обычной прочности и ставятся в отверстия диаметром на 3-4 мм больше диаметра болта. Термин "грубая" или "нормальная" точность связан с допусками на изготовление болта. Соединение простое, но деформативное.

Болты повышенной точности при изготовлении обтачиваются и ставятся в отверстия, диаметр которых всего на 0,3 мм больше диаметра болта. Соединение плотное, но сложное при монтаже.

Высокопрочные-, болты изготавливают из легированных сталей, ставят в отверстия диаметром на 3..4 мм больше диаметра болта и затягивают специальным "тарировочным" ключом, позволяющим контролировать силу натяжения. Сдвигающая сила в этом случае воспринимается за счет сил трения, возникающих между соединяющими плоскостями. Соединение простое и надёжное, используется в несущих конструкциях для соединения элементов (например, поясов и стенки балки), а также в монтажных стыках.

Болтовые соединения применяются как для листового, так и профильного металла. Соединение выполняется либо внахлестку, либо с накладками. Нахлесточное соединение возможно для листового проката (рис. 1.5). Расположение болтов рядовое или шахматное (рис. 1.5). Количество болтов определяется расчетом. Расстояние между осями болтов назначаются с учетом минимально необходимых по [6].

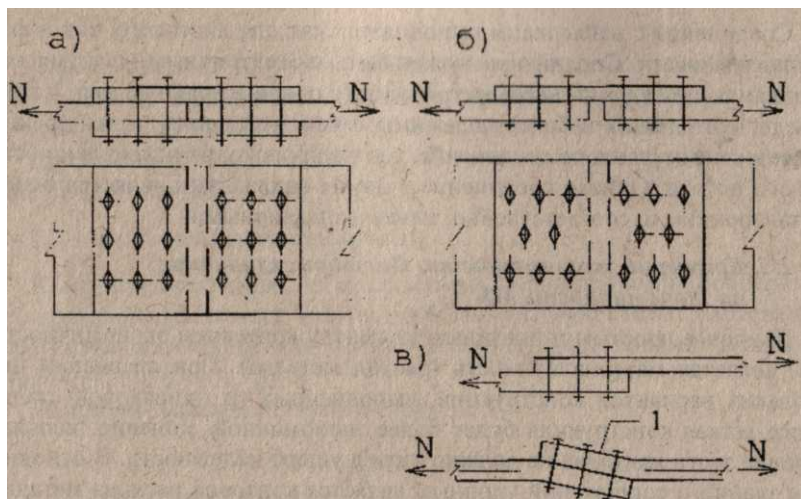
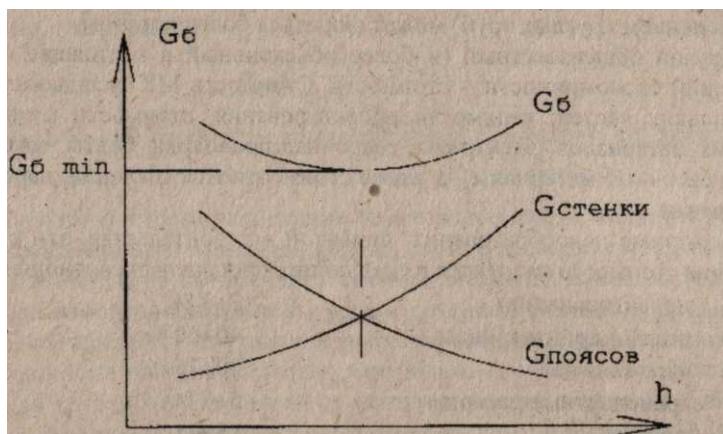


Рис. 1.5. Болтовые соединения:
 а - с двумя накладками (рядовое расположение болтов), б - с одной накладкой (шахматное расположение болтов), в - внахлестку (1 - в деформированном состоянии)



Бюпт

Рис. 1.6. График зависимости массы балки от высоты сечения

Соединение с накладками выполняется как для листового, так и фасонного проката. Соединение может быть симметричным (с двумя накладками, рис. 1.5 а) и несимметричным (с одной накладкой рис. 1.5 б). Предпочтительным и более надежным с конструктивной точки зрения является симметричное соединение, т.к. не происходит искривление силового потока. Однако соединение с двумя накладками является более металлоемким и, соответственно, менее экономичными.

1. 7. Критерии экономичности. Факторы, влияющие на экономичность МК

Наиболее простым и понятным инженеру критерием экономичности МК является материалоемкость (расход металла). При сравнении нескольких вариантов конструкций, выполненных из одинаковой стали, более легкая конструкция будет более экономичной. Конечно, использование этого критерия не должно идти в ущерб надежности. В отношении зданий и сооружений удобным является критерий расхода металла на единицу площади или объема ($\text{кг}/\text{м}^2$, $\text{кг}/\text{м}^3$). Критерий металлоемкости может быть использован как на стадии сравнения вариантов, так и на стадии рабочего проектирования. К сожалению, этот критерий не применим в случае, когда конструкции в разных вариантах изготовлены из разной стали, и более легкий вариант (из легированной стали или с применением круглых труб) может оказаться более дорогим.

Другой общеизвестный (и более объективный в настоящее время) критерий экономичности ~ стоимость. Стоимость МК складывается из нескольких частей: стоимости проектирования, стоимости металла и других материалов (электроды, сварочная проволока, болты, заклепки, лакокрасочные материалы), а также стоимости изготовления, перевозки и монтажа.

В системе ценообразования, принятой в строительстве, эти составляющие стоимости находятся в следующих процентных соотношениях:

- | | |
|-------------------------|------------|
| - проектирование | 2-3 %; 40- |
| - сталь и др. материалы | гБО %; |
| - изготовление | 20-25 %; |
| - транспортные расходы | 5+7 %; |
| - монтаж | 15ч-25%. |

Критерий стоимости при оценке конструкций можно использовать в виде отдельных частей, например стоимости проектирования, либо в виде комплексного показателя - стоимости "в деле", который учитывает все составные части стоимости.

Наконец, наиболее общим и объективным критерием экономичности МК являются "приведенные" затраты, которые учитывают не только стоимость смонтированных МК, но и расходы на их эксплуатацию. Рассмотрим более подробно эти критерии, а также факторы, влияющие на экономичность МК.

1.7.1. Критерий металлоемкости

Какие факторы влияют на металлоемкость конструкций? Во-первых, это применяемый металл. Используя более прочную сталь в растянутых или изгибаемых элементах, можно добиться существенной экономии стали (до 20-30% [3, 4]).

Например, масса растянутого стержня:

$$m_p = \frac{N}{R_y} \cdot \ell \cdot \gamma \cdot \psi_k$$

где ψ_k - конструктивный коэффициент, учитывающий массу дополнительных деталей, $\psi_k > 1$. Чем больше прочность металла - R_y , тем меньше масса стержня.

В тоже время в сжатых элементах прочную сталь использовать невыгодно, т.к. их масса:

$$m_c = \frac{N}{\varphi \cdot R_y} \cdot \ell \cdot \gamma \cdot \psi_k \quad (1.2)$$

Увеличение прочности компенсируется снижением коэффициента продольного изгиба $\varphi < 1$ (т.е. чем больше R_y , тем меньше φ).

Другим фактором, влияющим на металлоемкость, является рациональная компоновка элементов конструкций. В этом случае важным является выбор типа поперечного сечения элемента. Известно, что для сжатых элементов наиболее выгодным сечением является круглая труба, для изгибаемых - двутавр и коробчатое сечение. При использовании труб экономия металла достигается не только за счет рационального сечения (в трубах металл удален от центра тяжести сечения, что обеспечивает наиболее высокие радиусы инерции i_x, i_y при фиксированной площади), но и за счет эффективности узлов металлических конструкций, отсутствия дополнительных деталей.

- коэффициенты радиусов, инерции

$$\alpha = i_x / h, \beta = i_y / b;$$

- коэффициенты ядровых расстояний

$$= W_y / (A \cdot b);$$

$$\rho_x = W_x / (A \cdot h), \rho_y =$$

- удельный момент сопротивления

$$\omega = W / A^{1.5}$$

- удельный момент инерции кручения

$$\eta = J_t / A^2$$

где J_t - момент инерции сечения при кручении.

Эффективность сечения тем выше, чем больше эти показатели при прочих равных условиях.

Важным показателем эффективности сечения элемента является его относительная тонкостенность $t/h, t/b$. Чем меньше этот показатель, тем меньше расхода металла, т.е. сечение экономичнее. Нижняя граница показателя тонкостенности зависит от условий коррозионного износа и устойчивости сжатого элемента. Наиболее тонкостенной может быть круглая труба $t/D > 1/250$ (D - наружный диаметр трубы). Для сравнения в прямоугольных гнутосварных трубах $t/h > 1/40$, в сварных трубах из двух прокатных уголков $t/b > 1/17$.

При компоновке элементов конструкций также устанавливаются геометрические параметры, определяющие оптимальный расход металла. Например, в фермах - это очертание конструкции, тип решетки, длина панели поясов. В фермах больших пролетов (свыше 40 м) выгодно использовать очертание по параболе (рис. 2.13-6), которое хорошо соответствует эпюре изгибающих моментов. В фермах пролетом до 40 м выгодным по расходу металла является трапецидальное очертание (рис. 2.13-3). Но трудоемкость изготовления такой фермы значительна, т.к. различны длины элементов решетки и геометрия узлов. Поэтому в области малых и средних пролётов (до 40 м) применяются фермы с параллельными поясами (рис. 2.13-2), которые на 3..4% тяжелее трапецидальных, но более технологичны при изготовлении.

И, наконец, при компоновке элементов конструкций необходимо учитывать экономичность соединений и узловых сопряжений. Вне сомнений, сварные соединения наиболее технологичны, обеспечивают строительство простых узлов. На примере ферм - узловых сопряжения могут быть на фасонках (рис. 2.16 а, б) и бесфасоночные (рис. 2.16 в, г). Во втором случае расход металла на ферму снижается на 12.. 15 % только за счет отсутствия дополнительных деталей (фасонок, прокладок).

Глобальным фактором, влияющим на металлоемкость, является общая компоновка здания: установление генеральных размеров конструкций (пролет, высота), размещение несущих конструкций в плане (выбор

типа планировки, шага несущих **элементов**), компоновка связей, т.е. второстепенных элементов, объединяющих основные несущие. Задачи компоновки выгодно решать путем сравнения вариантов, и в то же время выбор наиболее эффективной схемы в значительной мере является результатом творческой интуиции инженера.

При компоновке здания важным является принцип концентрации материала в несущих элементах, который приводит не только к экономии массы металла, но и уменьшению трудоемкости и стоимости изготовления. Принцип концентрации предполагает увеличение шага несущих конструкций до 12, 18, 24 м. При этом нагрузка на несущие конструкции и соответственно, их масса возрастает, но количество несущих элементов уменьшается, что в целом приводит к снижению массы каркаса здания. Известно, также, что изготовить тонну крупных элементов МК проще и дешевле, чем тонну легких.

При использовании принципа концентрации материала выгодно учитывать пространственную работу здания. Промежуточные элементы, соединяющие несущие МК, при большом шаге получаются мощными. Они снижают и перераспределяют усилия в несущих конструкциях-что также позволяет снизить массу последних.

Таким образом, для создания оптимальной по расходу металла конструкции необходимо вариантное решение ряда задач:

- выбор материала и формы поперечного сечения профилей;
- компоновка элементов конструкций;
- выбор типа узлов и соединений;
- компоновка каркаса здания (сооружения).

В настоящее время возможно решение этих задач методами математического программирования с помощью ЭВМ. Задача оптимизации заключается в составлении и минимизации целевой функции:

$$C = f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = C_{\min} \quad (1.3)$$

при заданных ограничениях.

Если в качестве критерия оптимальности принята масса несущих конструкций, то целевая функция наиболее простая

$$G = \gamma \sum_{i=1}^n (A_i \cdot \ell_i) \quad (1.4)$$

где G - теоретическая масса конструкции; A_j - площадь, а J_i - длина i-го элемента.

Для учета второстепенных деталей конструкции в целевую функцию вводится конструктивный коэффициент γ :

$$G = \gamma \sum^n (A_i \cdot \ell_i \cdot \psi_i) \quad (1.5)$$

Приведем пример использования целевой функции.

В составных балках двутаврового сечения (рис. 2.1 б) высота может быть назначена из условия минимума массы балки. Целевая функция в этом случае:

$$G_6 = G_n + G_{CT} = (2 \cdot A_f \cdot \psi_f + A_w \cdot \psi_w) \cdot \ell \cdot \gamma = \left(\frac{2 \cdot 0.85 \cdot M_{\max}}{h \cdot R_y} \cdot \psi_f + h \cdot t_w \cdot \psi_w \right) \cdot \ell \cdot \gamma, \quad (1.6)$$

где G_n , G_{CT} - соответственно, масса поясов и стенки; A_f , A_w - площадь поясов и стенки; ψ_f , ψ_w - конструктивные коэффициенты, соответ-

$$\frac{\partial G_6}{\partial h} = 0$$

ственно, поясов и стенки, учитывающие массу дополнительных деталей (рёбра жесткости, накладки в монтажных стыках). Минимум целевой функции

$$(1.7)$$

откуда оптимальная по критерию массы высота балки:

$$h_{\text{опт}} = \kappa \cdot \sqrt{W_{TP} / t_w}, \quad (1.8)$$

где $\kappa = 1, 1.1, 1.2$ - коэффициент, зависящий от конструкции балки (сварная или клепаная, разрезная или неразрезная, см. п.2.1.1);

$W_{TP} = M_{\max} / R_y$ - "требуемый" момент сопротивления балки из условия прочности;

t_w — толщина стенки, приближенно назначаемая в зависимости от

высоты балки
$$h \approx \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{10} \right) \cdot \ell$$

Графически нахождение оптимальной по расходу металла высоты представлено на рис. 1.6. Минимум функции $G_6 = f(h)$ является "размытым", и поэтому отступление от оптимального значения высоты на 10-И 5 % приводит к увеличению массы балки всего на 3-г4 %.

1.7.2. Критерий стоимости

Структура стоимости МК рассмотрена в начале главы 1.6. Наибольший "удельный вес" (до 60 %) в этой структуре имеет стоимость материалов. Из чего же складывается стоимость стального проката?

Стоимость стали должна определяться прейскурантом оптовых цен, которые составлены по видам металлопродукции на 1т теоретической

массы. Стоимость стали зависит от способа выплавки (сталь спокойная или кипящая, обычной прочности или легированная), вида и размеров профилей. Так, цена на листовую прокат зависит от толщины листа (тонколистовая сталь - более дорогая), цены на угловую сталь определяются шириной полки (более дорогой - "мелкий" уголок) и, наконец, цены на двутавры и швеллеры зависят от номера профиля. В оптовые цены также включают усреднённую стоимость перевозки металла от завода-прокатчика до ближайшей к заводу по производству металлоконструкций железнодорожной станции или пристани. Расходы по перевозке стали от станции до завода металлоконструкций включают в заготовительно-складские.

Оптовые цены на металлопрокат увеличиваются за счет дополнительных начислений:

- заготовительно-складские* расходы (разгрузка, сортировка, чистка и хранение металла);
- приплаты по договорным условиям (проведение дополнительных испытаний для уточнения механических характеристик стали, за мерность длины проката);
- увеличение массы проката в связи с отклонением её от теоретического значения (плюсовые допуски при прокатке);
- увеличение массы металла за счет отходов при изготовлении.

Привести конкретные проценты на каждый из перечисленных пунктов сейчас невозможно, т.к. цены в основном договорные и диктуются заводами-монополистами (в Западной Сибири - это Западно-Сибирский металлургический комбинат - ЗСМК, Кузнецкий металлургический комбинат - КМК и заводы металлоконструкций - ЗМК).

Оптовые цены на вспомогательные материалы для изготовления МК (электроды, сварочная проволока, болты и другие метизы) определяются прейскурантами ведомств, производящих эти изделия. Стоимость перевозки в оптовых ценах на эти материалы не учитывается и оплачивается отдельно.

Теперь, для сравнения, определим оптимальную высоту составной двутавровой балки на основе критерия стоимости металла. Целевая (Ъункция:

(1.9)

где c_f, c_w - удельная стоимость металла поясов и стенки (в р./т). $G_g = (2 \cdot A_f \cdot \psi_f \cdot c_f + A_w \cdot \psi_w \cdot c_w) \cdot \ell \cdot \gamma$

Заменяя значение

$$A_f = \frac{0,85 \cdot M_{\max}}{h \cdot R_y}$$

и $A_w = h \cdot t_w$ и минимизируя

функцию $\partial C_g / \partial h = 0$ получим:

$$h_{\text{опт}} = k \cdot \sqrt[3]{\lambda_w \cdot W_{\text{тр}}} \quad (1.10)$$

где $k = 0,95 \div 1,02$ - коэффициент, учитывающий особенность конструкции и работы балки;

$$\lambda_w = \lambda_w / t_w \approx h_w / t_w \quad \text{- гибкость стенки.}$$

Стоимость изготовления (заводская себестоимость) составляет до 25 % общей стоимости МС. Стоимость изготовления тесно связана с трудоемкостью. Величина трудоёмкости зависит от сложности изготовления конструкции и технологических особенностей производства (степени механизации и автоматизации ЗМК). При обработке металла на заводах металлоконструкций используется до 40 технологических операций: резка механическая или газовая, сверление, строжка, сварка и др. На долю резки и сварки приходится до 50 % от общей трудоемкости.

Установлено, что трудоемкость изготовления конструкции в функции её массы является выпуклой кривой (рис. 1.7). Угол наклона кривой зависит от степени сложности конструкции и наличия оборудования. Понятно, что упрощение конструкции и автоматизация ЗМК снижают трудоёмкость изготовления и делают эту кривую более пологой. Трудоёмкость изготовления 1 т конструкции в функции массы или пролёта (рис. 1.8) представляется убывающей кривой. Здесь наглядно проявляется принцип концентрации материала.

Таким образом, для снижения трудоемкости, а значит и стоимости изготовления, необходимо использовать, во-первых, принцип концентрации металла (при этом снижается масса конструкций), во-вторых, принцип упрощения конструктивной формы и, в третьих, совершенствовать технологию изготовления МК. Для упрощения конструкций возможно использование типизации, предполагающей уменьшение числа типов и типоразмеров элементов, что ведет к их повторяемости (серийности). На основе типизации созданы конструктивные типовые решения, типовые проекты. Некоторый перерасход металла, который может возникать при использовании типовых проектов, компенсируется снижением стоимости изготовления.

В заводскую себестоимость помимо затрат на изготовление МК входят цеховые и общезаводские расходы: ремонт оборудования, зарплата рабочих и инженерно-технического персонала, административно-управленческие расходы и многие другие. Определение трудоемкости и стоимости изготовления - сложная задача. Для ее решения удобно разделить конструкцию на основные детали, воспринимающие усилия (например, пояса и стенка балки, пояса и решетка фермы) и дополнительные. По аналогии с конструктивным коэффициентом массы можно ввести коэффициент трудоемкости технологических операций:

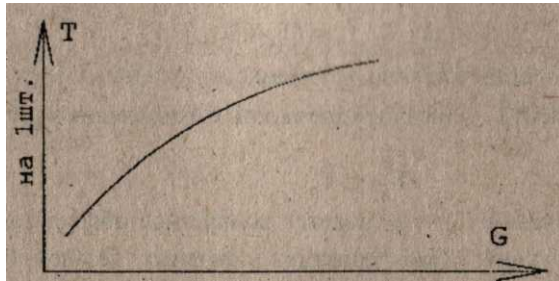


Рис. 1.7. Трудоемкость изготовления 1 шт. конструкции в функции Веса G

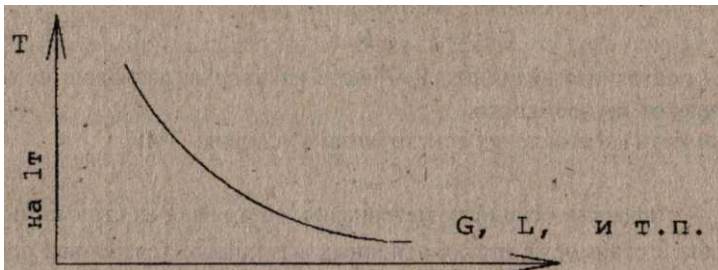


Рис. 1.8. Трудоемкость изготовления 1 т конструкций в функции основных параметров (вес, пролет и т.п.)

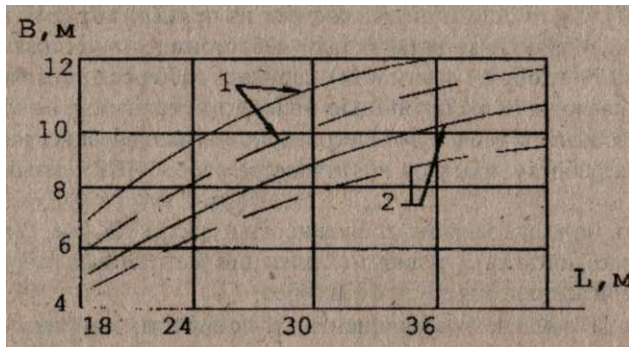


Рис. 1.9. Оптимальный шаг ферм:
 1 - при сквозных прогонах, 2 - при прокатных прогонах
 (____ по стоимости, ____ по массе)

- вследствие статической определенности балочная система нечувствительна к осадкам опор и перепадам температур, т.е. дополнительные внутренние усилия от этих воздействий не возникают, что также снижает металлоемкость.

В то же время балочные большепролетные конструкции имеют ряд существенных недостатков:

- сравнительно большая масса "тяжелой" фермы;
- значительная ($h/l = 1/8 \dots 1/10$) и негабаритная по условиям перевозки высота ($h > 3,85$ м);
- вследствие большой высоты, во-первых, тяжелую ферму приходится перевозить и монтировать отдельными мелкими элементами ("россыпью"), что усложняет работу, снижает качество и увеличивает срок строительства, и, во-вторых, увеличивает расходы на отопление и вентиляцию здания.

Балочные системы применяются, в основном, при поперечной и продольно-поперечной планировках. Пример связевой компоновки балочной системы при поперечной планировке - на рис. 4.2. Сечения стержней балочных конструкций аналогичны тяжелым фермам (рис. 2.14 п...ф).

4.2.2. Рамные большепролетные покрытия

Область применения рамных конструкций $l = 40 \dots 150$ м. В рамных системах ригель жестко сопрягается со стойками. Рамные системы -распорные, то есть от вертикальной нагрузки возникает не только вертикальная, но и горизонтальная составляющая опорной реакции. Следствие этого - ряд достоинств:

1. Рамы обладают большой поперечной жесткостью.
2. Благодаря разгружающим изгибающим моментам на опорах (рис. 4.3 б), пролетный момент в раме меньше, чем в балочной системе (при прочих равных условиях); поэтому рамы более экономичны по расходу металла.
3. Высота рамных систем меньше чем балочных, что упрощает транспортировку и монтаж, снижает расходы на отопление и вентиляцию.

Недостатки:

1. Для восприятия распора (горизонтальной составляющей опорной реакции) требуются мощные фундаменты (дополнительный расход бетона и арматуры).

2. Вследствие статической неопределенности рамы чувствительны к осадкам опор и перепадам температур, что может привести к дополнительным внутренним усилиям и расходу металла.

Большепролетные рамные конструкции могут быть сплошнотенча-тыми и сквозными (рис. 4.3 а, г, в), сопряжения стоек с фундаментами - как шарнирное, так и жесткое.

Сплошнотенчатые рамы применяются при пролетах 40...60 м. Благодаря форме поперечного сечения ригеля в виде составного двутавра и его малой высоте ($h/1 = 1/30...1/40$), такие рамы менее трудоемки при изготовлении и более удобны при транспортировке и монтаже, но более металлоемки чем сквозные.

Сквозные рамы выгодны при пролетах 50... 150 м. Высота ригеля рамы $h/1 = 1/12...1/20$ (рис. 4.3). Сквозные большепролетные рамы более экономичны по критерию металлоемкости, чем сплошнотенчатые рамы или балочные системы. Однако при больших пролетах ригели сквозных рам негабаритны по условиям перевозки (их высота больше 3,85 м), что усложняет монтаж. Поперечные сечения стержней сквозных рам пролетом 50...60 м могут быть аналогичны легким фермам (рис. 2.14 а...о), а при больших пролетах и внутренних усилиях - такие же как и в тяжелых фермах (рис. 2.14 п...ф). Рамные системы используются при поперечной и продольно-поперечной планировках. Пример связевой компоновки при продольно-поперечной планировке - на рис. 4.4.

' 4.2.3. Консольные большепролетные покрытия

Консольные системы (рис. 4.5) применяются при продольной планировке. Они выгодны при $l/B \geq 2.5$ (рис. 4.1), то есть лишь в этом случае расход металла и стоимость "в деле" консольных покрытий меньше аналогичных показателей балочных и рамных систем. Основное достоинство консольных систем - возможность удлинения здания (увеличения пролета -l) без существенных переделок. Недостатки:

- большие внутренние усилия и прогибы консолей (изгибающий момент в 4 раза, а прогиб в 8 раз больше чем в балочной конструкции при прочих равных условиях);
- значительный расход материала на фундаменты вследствие больших выдерживающих усилий.

Консольные системы делятся на консольно-рамные и консольно-вантовые (рис. 4.5). Консольно-рамные - более жесткие, а консольно-вантовые обладают меньшей трудоемкостью изготовления и монтажа. Ввиду небольшой высоты сечения ригеля в консольно-вантовых систе-

65

- вследствие статической определенности балочная система нечувствительна к осадкам опор и перепадам температур, т.е. дополнительные внутренние усилия от этих воздействий не возникают, что также снижает металлоемкость.

В то же время балочные большепролетные конструкции имеют ряд существенных недостатков:

- сравнительно большая масса "тяжелой" фермы;
- значительная ($h/l = 1/8 \dots 1/10$) и негабаритная по условиям перевозки высота ($h > 3,85$ м);
- вследствие большой высоты, во-первых, тяжелую ферму приходится перевозить и монтировать отдельными мелкими элементами ("россыпью"), что усложняет работу, снижает качество и увеличивает срок строительства, и, во-вторых, увеличивает расходы на отопление и вентиляцию здания.

Балочные системы применяются, в основном, при поперечной и продольно-поперечной планировках. Пример связевой компоновки балочной системы при поперечной планировке - на рис. 4.2. Сечения стержней балочных конструкций аналогичны тяжелым фермам (рис. 2.14 п...ф).

4.2.2. Рамные большепролетные покрытия

Область применения рамных конструкций $l = 40 \dots 150$ м. В рамных системах ригель жестко сопрягается со стойками. Рамные системы -распорные, то есть от вертикальной нагрузки возникает не только вертикальная, но и горизонтальная составляющая опорной реакции. Следствие этого - ряд достоинств:

1. Рамы обладают большой поперечной жесткостью.
2. Благодаря разгружающим изгибающим моментам на опорах (рис. 4.3 б), пролетный момент в раме меньше, чем в балочной системе (при прочих равных условиях); поэтому рамы более экономичны по расходу металла.
3. Высота рамных систем меньше чем балочных, что упрощает транспортировку и монтаж, снижает расходы на отопление и вентиляцию.

Недостатки:

1. Для восприятия распора (горизонтальной составляющей опорной реакции) требуются мощные фундаменты (дополнительный расход бетона и арматуры).

2. Вследствие статической неопределимости рамы чувствительны к осадкам опор и перепадам температур, что может привести к дополнительным внутренним усилиям и расходу металла.

Большепролетные рамные конструкции могут быть сплошностенчатыми и сквозными (рис. 4.3 а, г, в), сопряжения стоек с фундаментами - как шарнирное, так и жесткое. Сплошностенчатые рамы применяются при пролетах 40...60 м. Благодаря форме поперечного сечения ригеля в виде составного двутавра и его малой высоте ($h/1 = 1/30...1/40$), такие рамы менее трудоемки при изготовлении и более удобны при транспортировке и монтаже, но более металлоемки чем сквозные.

Сквозные рамы выгодны при пролетах 50... 150 м. Высота ригеля рамы $h/1 = 1/12...1/20$ (рис. 4.3). Сквозные большепролетные рамы более экономичны по критерию металлоемкости, чем сплошностенчатые рамы или балочные системы. Однако при больших пролетах ригели сквозных рам негабаритны по условиям перевозки (их высота больше 3,85 м), что усложняет монтаж. Поперечные сечения стержней сквозных рам пролетом 50...60 м могут быть аналогичны легким фермам (рис. 2.14 а...о), а при больших пролетах и внутренних усилиях - такие же как и в тяжелых фермах (рис. 2.14 п...ф). Рамные системы используются при поперечной и продольно-поперечной планировках. Пример связевой компоновки при продольно-поперечной планировке - на рис. 4.4.

4.2.3. Консольные большепролетные покрытия

Консольные системы (рис. 4.5) применяются при продольной планировке. Они выгодны при $1/B \geq 2.5$ (рис. 4.1), то есть лишь в этом случае расход металла и стоимость "в деле" консольных покрытий меньше аналогичных показателей балочных и рамных систем. Основное достоинство консольных систем - возможность удлинения здания (увеличения пролета -l) без существенных переделок. Недостатки:

- большие внутренние усилия и прогибы консолей (изгибающий момент в 4 раза, а прогиб в 8 раз больше чем в балочной конструкции при прочих равных условиях);
- значительный расход материала на фундаменты вследствие больших выдергивающих усилий.

Консольные системы делятся на консольно-рамные и консольно-вантовые (рис. 4.5). Консольно-рамные - более жесткие, а консольно-вантовые обладают меньшей трудоемкостью изготовления и монтажа. Ввиду небольшой высоты сечения ригеля в консольно-вантовых систе-

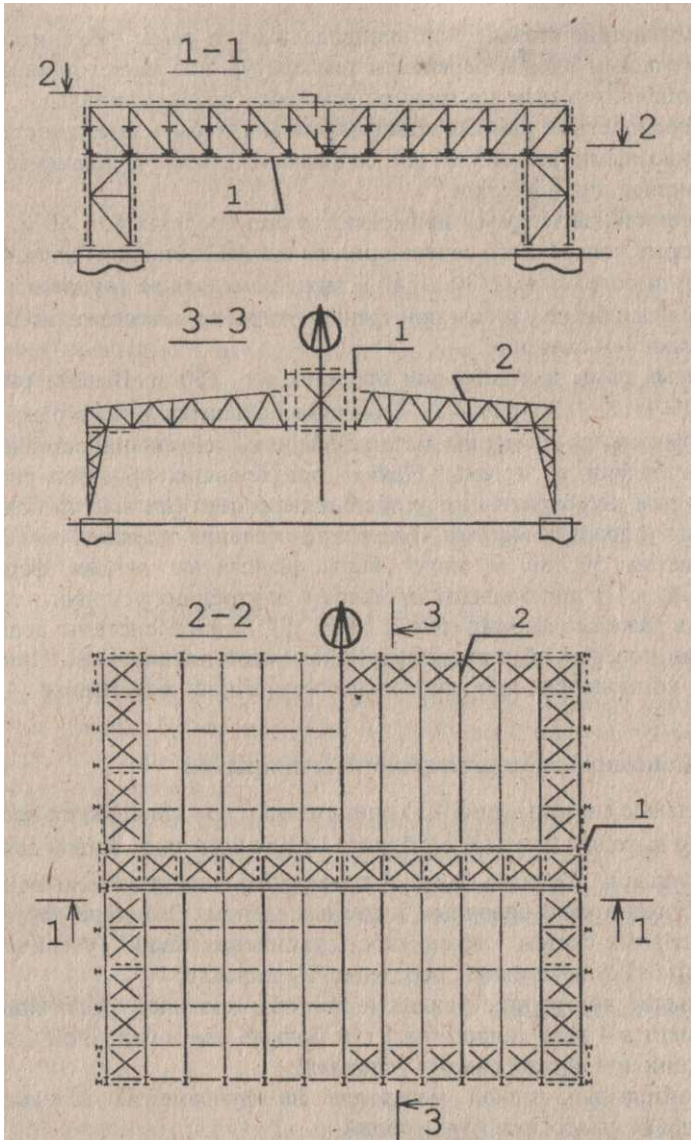


Рис. 4.4. Продольно-поперечная компоновка рам каркаса 1 - блок продольных рам, 2 - поперечные полурамы

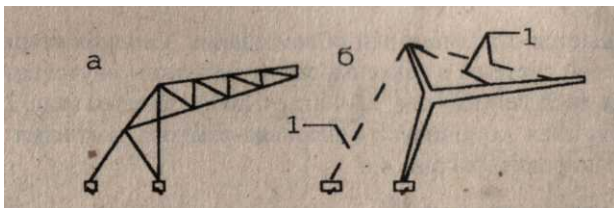


Рис. 4.5. Схемы консольно-рамных сиртем: 1 - вантаы

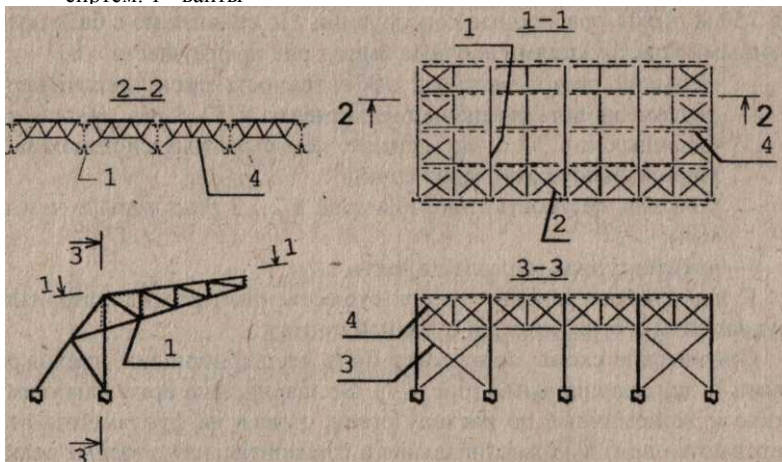


Рис. 4.6. Свяэая компоновка консольно-рамного покрытия:

1 - рама, 2 - горизонтальные связи покрытия, 3 - вертикальные связи по опорам, 4 - вертикальные связи по покрытию



Рис. 4.7. Статические схемы арок

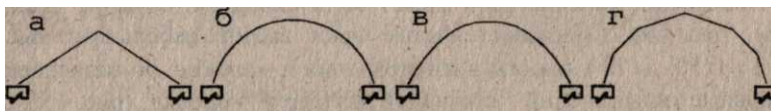


Рис. 4.8. Очертания арок

мах уменьшается отапливаемый объем здания. Сечения стержней кон-сольно-рамной системы в зависимости от величины внутренних усилий аналогичны либо легким (рис. 2.14 а...о), либо тяжелым (рис. 2.14 п...ф) фермам. Связевая компоновка консольно-рамного покрытия при продольной планировке - на рис. 4.6.

4.2.4. Арочные покрытия

Рациональная область применения арочных систем - пролеты от 80 до 250 м.

Арки - распорные конструкции. По сравнению с балочными и рамными конструкциями арочные имеют ряд преимуществ:

- меньший расход металла; эффективность арок увеличивается с ростом пролета (изгибающие моменты в 5...8 раз меньше чем в балочных и в 3...5 раз меньше, чем в рамных системах за счет рационального очертания арок);
- большая жесткость (прогибы арок в 2...3 раза меньше чем в рамах);
- архитектурная выразительность.

К недостаткам можно отнести существенный расход материала на фундаменты и относительно сложный монтаж.

Статические схемы арок могут быть бесшарнирными, трехшарнирными и двухшарнирными (рис. 4.7). Бесшарнирные арки наиболее жесткие и экономичные по расходу стали, однако на фундаменты от них передаются не только вертикальная и горизонтальная опорные реакции, но и опорные изгибающие моменты, что увеличивает массу фундаментов. Трехшарнирные арки неэкономичны по расходу стали и сложны при монтаже из-за ключевого шарнира, однако нагрузки на фундаменты от них значительно меньше. Наиболее распространены двухшарнирные арки, обладающие достоинствами двух предыдущих схем.

Большое влияние на величину внутренних усилий, а значит и расход металла, оказывает очертание арки (рис. 4.8): треугольное, круговое, параболическое и полигональное. При действии равномерно распределенной нагрузки наиболее выгодно очертание по квадратной параболе. Арки кругового очертания наименее трудоемки при изготовлении.

Поперечное сечение арок может быть сплошностенчатым и сквозным (рис. 4.9). Сплошностенчатые арки имеют небольшую высоту ($h/l = 1/50... 1/70$), просты в изготовлении и монтаже, но металлоемки. Основные типы сечений - составной двутавр и "коробка" (рис. 4.9). При высоте арки свыше 1 м она делается сквозной. Высота сечения сквозной арки $h/l = 1/30... 1/40$, типы сечений аналогичны либо легким (рис. 2.14 а...о), либо тяжелым (рис. 2.14 п...ф) фермам.

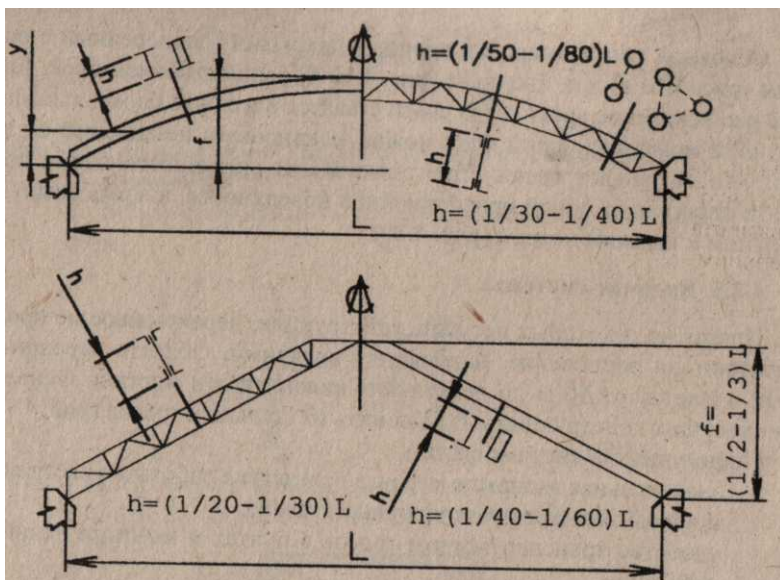


Рис. 4.9. Типы поперечных сечений арок.

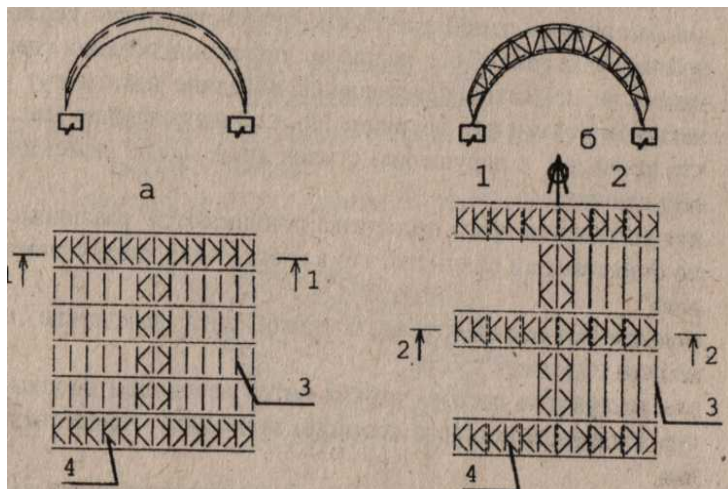


Рис. 4.10. Компановка арочного покрытия:
 а - рядовая, б - блочная, 1 - связи по нижним поясам арок, 2 - по верхним поясам, 3 - прогон, 4 - элемент связей

Основной тип планировки арочных покрытий - поперечный с рядовым (рис. 4.10 а) или блочным (рис. 4.10 б) расположением арок. Блочное расположение арок, когда связи ставятся в каждом блоке, выгодно с позиций монтажа (любой блок можно монтировать независимо от других, что сокращает сроки строительства). В сплошностенчатых арках связи ставятся по одной криволинейной поверхности, а в сквозных - по верхним и нижним поясам (рис. 4.10).

4.2.5. Висячие системы

Покрытия, в которых несущие конструкции, перекрывающие пролет, работают на растяжение, называются висячими. Область перекрываемых пролетов от 50 м до нескольких километров (в мостах). Основной тип несущих конструкций - гибкая нить из стальных тросов (рис. 4.11).

Преимущества висячих систем:

- значительная экономия металла вследствие работы на растяжение и использования высокопрочных сталей;
- удобство транспортировки тросов в бухтах и монтажа покрытия лебедками;
- архитектурная выразительность.

К недостаткам висячих конструкций относятся:

- кинематическая изменяемость висячей системы при неравновесной нагрузке (рис. 4.11); например, при возникновении снегового мешка на покрытии перемещения по длине нити могут различаться не только по величине, но и по направлению (рис. 4.11), что приведет к нарушению стыков кровельных элементов и их обрушению;
- для устранения этого недостатка принимаются различные меры по стабилизации покрытия, что в итоге увеличивает стоимость "в деле";
- повышенная деформативность гибкой нити, вследствие малого модуля упругости тросов;
- для восприятия распора гибких нитей необходим опорный контур, стоимость которого достигает половины стоимости покрытия.

Висячие системы бывают плоскими и пространственными. Плоские системы, как правило, применяются на прямоугольном плане при поперечной планировке гибких нитей (рис.4.16 а, г). Плоские висячие покрытия делятся на однопоясные, двухпоясные и комбинированные.

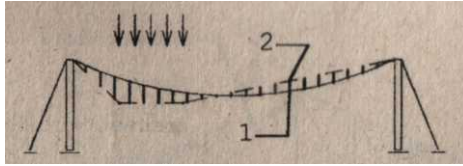


Рис. 4.11. Перемещения кинематически изменяемой
висячей системы:

1 - Гибкая стальная нить, 2 - деформированное положение нити

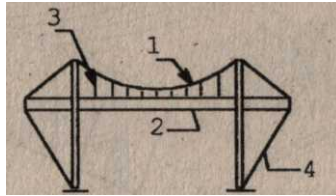


Рис. 4.12. Пример комбинированной системы:

1 - нить, 2 - балка жесткости, 3 - подвеска, 4 - оттяжка

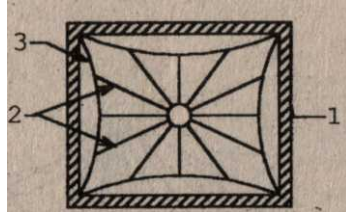


Рис. 4.13. Пример беззгибного опорного контура при применении
тросов-подборов: 1 - жесткий контур, 2 - ванты, 3 - трос-подбор

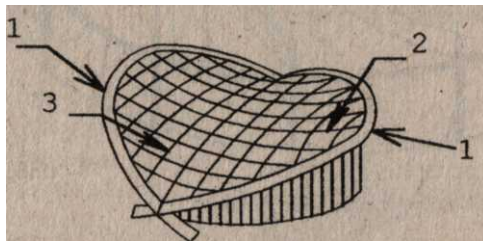


Рис. 4.14. Пример опорного контура из двух перекрестных арок: 1 -
арки, 2 - несущая нить, 3 - стабилизирующая

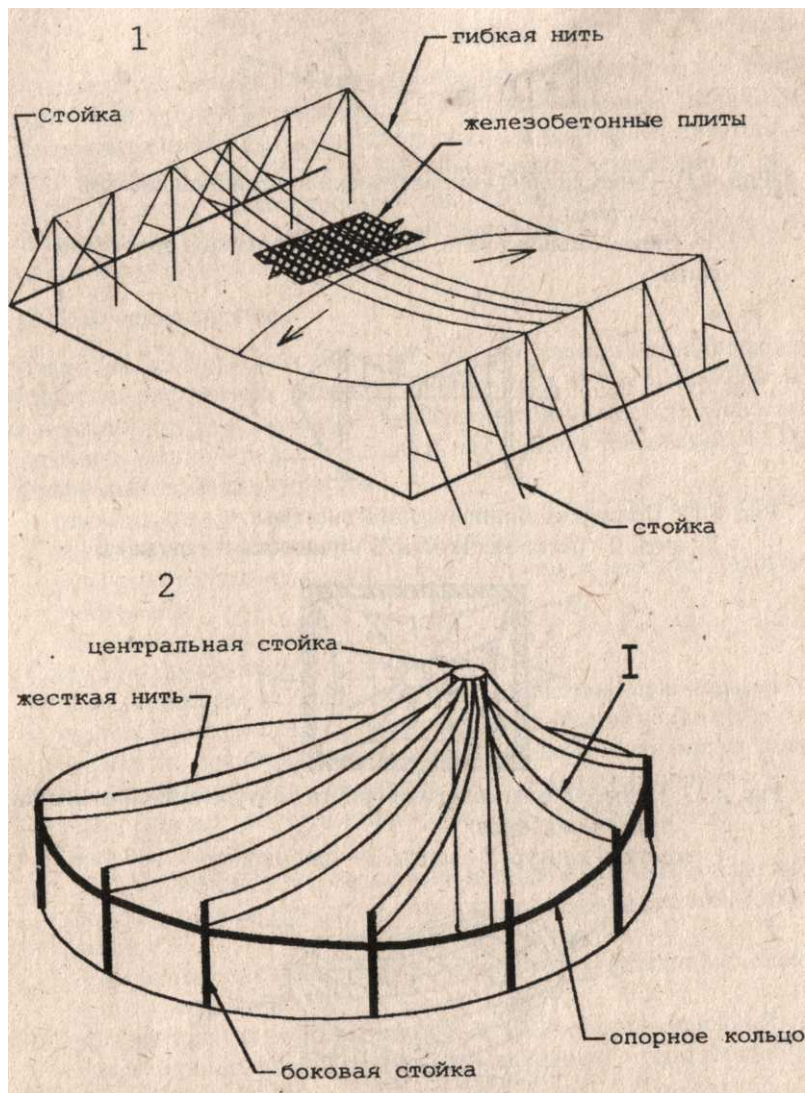


Рис. 4.15. Примеры конструктивных решений со стабилизацией: 1 - железобетонными плитами, 2 - с помощью жестких нитей

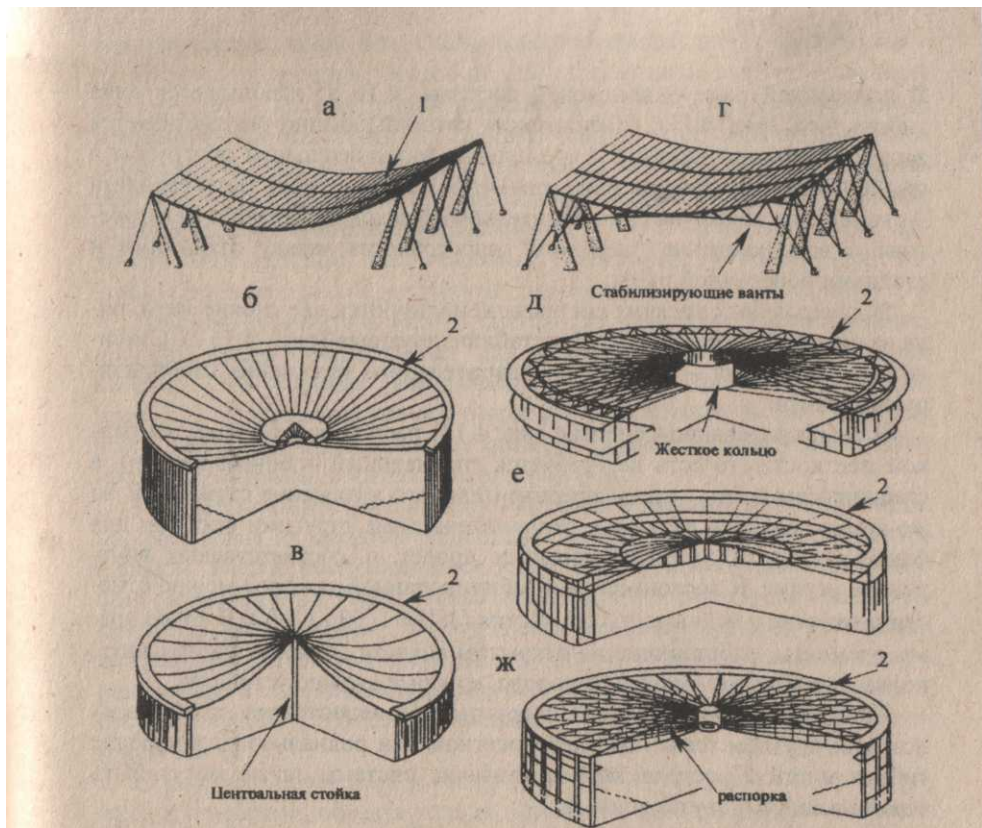
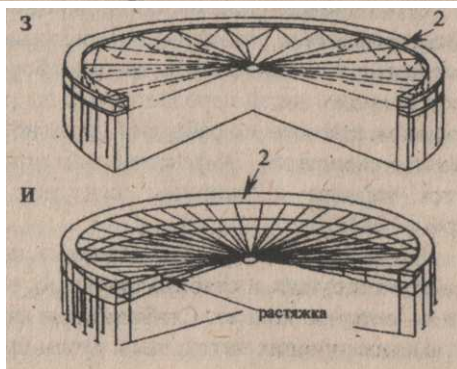


Рис. 4.16. Примеры компоновки висячих покрытий: однопоясные системы: а - на прямоугольном плане, б, в - на круглом плане, в - с центральной стойкой; двухпоясные системы: г - на прямоугольном плане, д-и - на круглом плане, 1 - ж/б плиты, 2 - опорное кольцо



В поперечной раме одноярусной системы (4.16 а) используется одна гибкая нить (рис. 4.11), стабилизация которой обычно осуществляется железобетонными плитами с временным дополнительным пригрузом и омоноличиванием стыков плит (рис. 4.15-1). Недостатки этого варианта - утяжеление покрытия с дополнительным расходом бетона и железобетона и возникновение "мертвого" пространства между оттяжками и стойками поперечной рамы.

В двухъярусных висячих системах используются две гибкие нити, одна из которых несущая, а другая стабилизирующая (рис. 4.16 г). Стабилизация покрытия - за счет предварительного натяжения стабилизирующей нити. В комбинированной системе (рис.4.12) распор воспринимается балкой жесткости (то есть не требуется специальный опорный контур), а стабилизация нити - путем предварительного натяжения оттяжек. В то же время подвески являются дополнительными упругими опорами для балки жесткости, уменьшающими ее пролет, и, соответственно, внутренние усилия. К достоинствам комбинированной системы можно отнести незначительную высоту покрытия ($h/l = 1/50 \dots 1/60$). В то же время, элементы, работающие на открытом воздухе (пилоны, гибкая нить, подвески), создают "мостики" холода, которые сложно устранять.

Пространственные висячие покрытия применяются на прямоугольном или круглом плане при перекрестной или радиальной планировке гибких нитей.

Пространственные висячие системы также могут быть одноярусными и двухъярусными.

Одноярусные системы образованы сеткой несущих нитей (рис. 4.16). Основным методом стабилизации системы - пригруз. Выгодным является вариант с использованием трос-подборов (рис. 4.13), при котором распор несущих нитей передается в углы рамы опорного контура. Элементы рамы при этом не работают на изгиб, и расход материала на опорный контур снижается. Эффективным и архитектурно выразительным является вариант с опорным контуром из двух перекрестных арок (рис. 4.14).

В двухъярусных пространственных покрытиях (рис. 4.16 д-и) имеется система несущих и стабилизирующих нитей. Распор от нитей передается на опорное кольцо. Стабилизация покрытия - как за счет натяжения стабилизирующих нитей, так и путем пригруза центральным кольцом.

4.2.6 Купольные покрытия

Куполом называется пространственная конструкция, поверхность которой образуется вращением плоской кривой относительно непод

вижной вертикальной оси. Область рациональных пролетов куполов - от нескольких десятков метров до 300м. Благодаря своему основному достоинству - *архитектурной выразительности* - купола, в основном, применяются в общественных зданиях: театрах (Оперный театр в Новосибирске), цирках, выставочных павильонах. В зависимости от очерта-ния(типа линии вращения) купола бывают коническими, сферическими, эллиптическими и параболическими(рис. 4.17). В плане купольные покрытия либо круглые, либо овальные. И, наконец, по конструкции купола делятся на плоские, ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые.

Плоский купол (рис. 4.20 б) состоит из радиально расположенных плоских ферм, объединенных для совместной работы центральной стойкой. По фермам укладывается система прогонов и связей (рис. 4.20 б). Плоские купола - безраспорные системы, и, как следствие этого, неэкономичны по расходу металла. Применяются при небольших пролетах, например, в покрытиях резервуаров.

Ребристый купол (рис. 4.20 в) - пространственная распорная система, состоящая из плоских радиальных ребер, объединенных в центре кольцом. Распор воспринимается нижним опорным кольцом, работающим на растяжение. Ребра купола могут быть как сквозными в виде легких ферм или полуарок, так и сплошностенчатыми в виде прокатных или сварных двутавров. Сквозные ребра более экономичны по критерию массы, а сплошностенчатые менее трудоемки при изготовлении. К ребрам купола шарнирно крепятся прогоны и система связей (рис. 4.20 в).

В ребристо-кольцевых куполах (рис. 4.20 г) прогоны жестко соединяются с ребрами, образуя кольца. При таком конструктивном решении прогоны работают не только на изгиб, но и на растяжение-сжатие (кольцевые усилия), а ребра купола, благодаря рамности (жесткости) узлов становятся легче. Система связей в этом купольном покрытии не требуется (рис. 4.20 г).

В сетчатых куполах (рис. 4.20 а) между ребрами и прогонами располагаются раскосы, распределяющие усилия по всей поверхности покрытия. Благодаря такому решению несущие элементы купола работают только на осевые усилия (растяжение или сжатие), что приводит к снижению их массы. Существует много разновидностей сетчатых куполов, и почти каждый из них, в силу своей уникальности, имеет собственное имя по имени автора покрытия. Например, классическое решение купола с крестовыми раскосами (рис. 4.20 а) называется куполом Шведлера. В других решениях систему ребер и прогонов заменяют на сетку, состоящую из жестких треугольных ячеек (рис. 4.19 в).

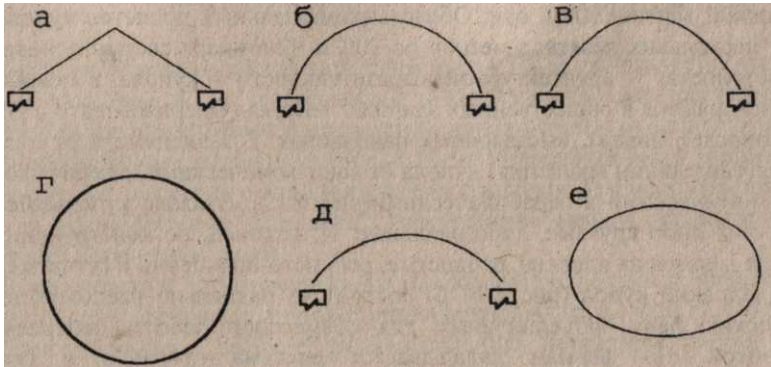


Рис. 4.17. Формы куполов:

- а - поперечный разрез конического купола, б - сферического,
- в - параболического, г - план для куполов,
- а, б, в, д, е - поперечный разрез и план эллиптического купола

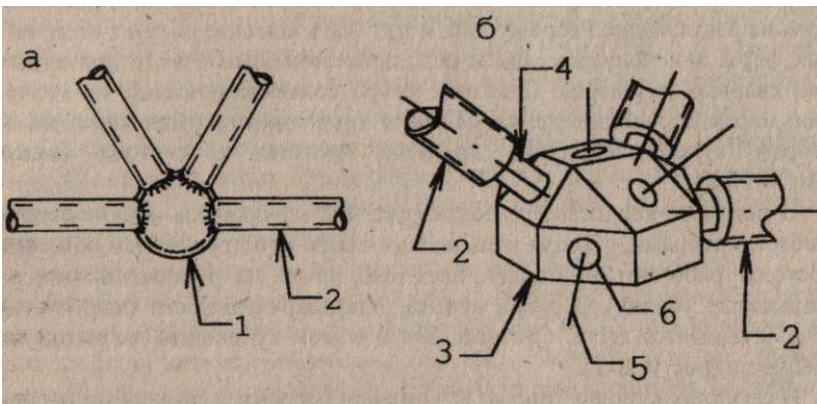


Рис. 4.18. Соединение стержней геодезического купола: 1 - шаровая вставка, 2 - стержень, 3 - узловой элемент (многогранник с резьбовыми отверстиями под болты), 4 - гайка высокопрочного болта, крепящего стержень к многограннику, 5 - ось стержня (стержень условно не показан), 6 - ось стержня (стержень условно не показан)

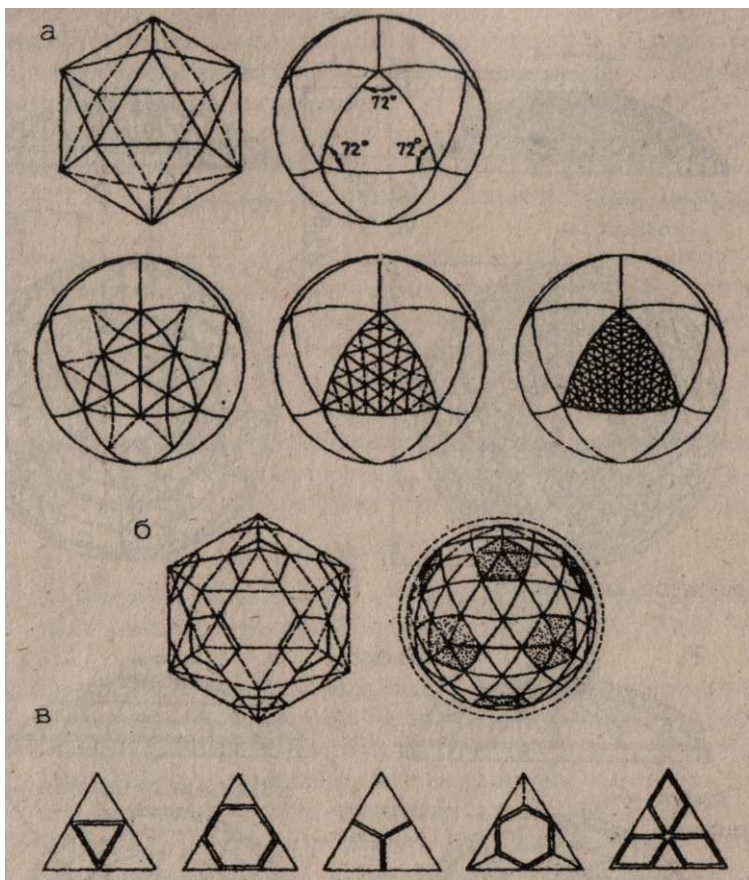


Рис. 4.19. Схемы образования поверхности геодезических куполов:
 а - принцип образования сетки купола Фуллера (последовательная разбивка сетки на сфере через 20-гранник); б - разбивка сетки через 32-гранник (купол Туполева); в - варианты заполнения ячеек поверхности купола

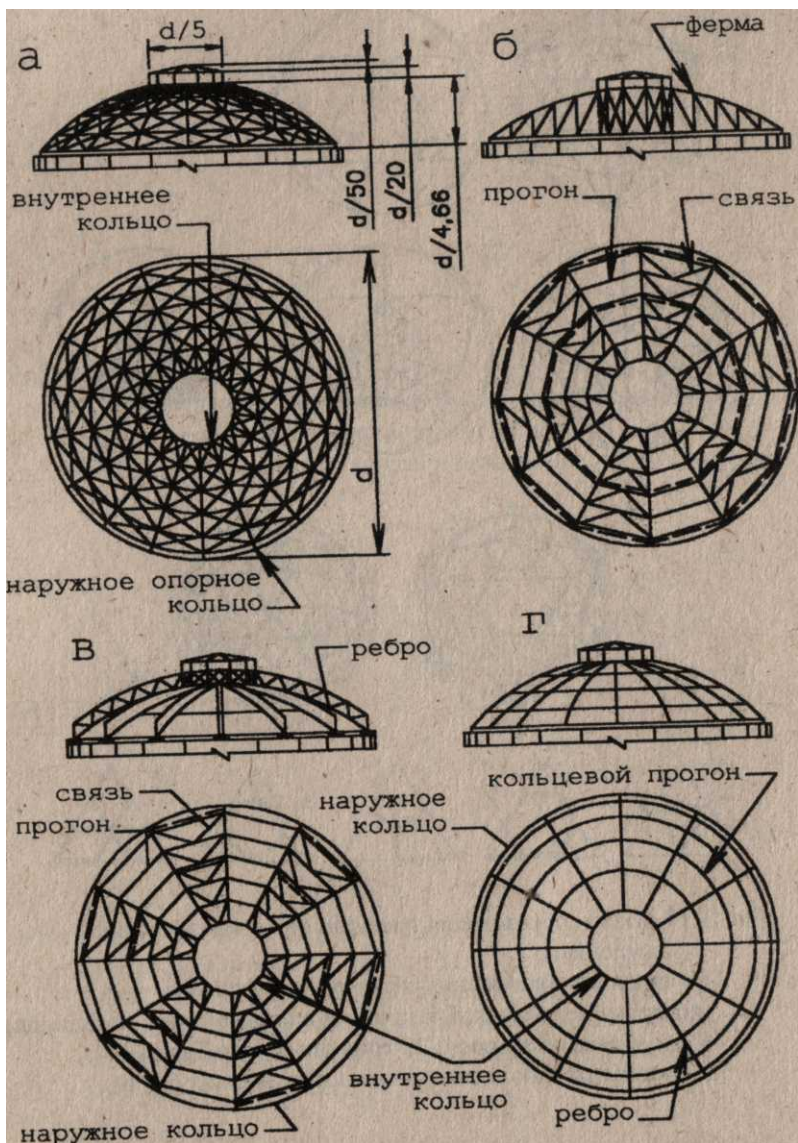


Рис. 4.20. Конструкции куполов:
 а - сетчатый, б - плоский, в - ребристый, г - ребри-
 кольцевой

Очень красивыми, легкими и *надежными* являются "геодезические" сетчатые купола - многогранники, вписанные в сферу (рис.4.19 а, б). Известны купола на основе вписанного додекаэдра (12-гранник с гранями в виде правильных пятиугольников); купола на основе вписанного икосаэдра (20-гранник из правильных треугольников) - купола Фулле-ра, Туполева и др. Грани геодезических куполов могут быть разбиты на разнообразие сетки с треугольными и ромбическими ячейками (рис. 4.19 в), что еще больше повышает архитектурную выразительность.

Сетчатые купола могут быть однослойными и двухслойными. Двухслойные купола размещаются на поверхностях двух концентрически расположенных сфер. Слои взаимосвязаны. Такие системы обладают очень большой жесткостью и могут перекрывать пролеты практически неограниченных размеров.

Стержневые элементы сетчатых куполов выполняются, в основном, из круглых труб, которые соединяются в узлах на шаровых вставках с помощью сварки или на винтах (рис. 4.18). Общим недостатком всех сетчатых куполов является большая трудоемкость сборки при монтаже.

Рекомендуемая литература

1. Бирюлев В.В., Кользеев А.А., Крылов И.И., Стороженко Л.И. Металлические конструкции (Вопросы и ответы). - М.: АСВ, 1994. -336 с.
2. Бирюлев В.В. Приближенная оценка стоимости и других технико-экономических показателей металлических конструкций 7 Метод, указания. - Новосибирск: НИСИ, 1988. - 26 с.
3. Горев В.В. и др. Металлические конструкции / Элементы стальных конструкций. - Т.1. - М.: Высш. школа, 1997. - 336 с.
4. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н. Техно-экономические основы проектирования строительных конструкций. - Киев-Донецк: Вища школа, 1980 . - 240 с.
5. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. - М.: Стройиздат, 1979. - 320 с;
6. СНиП П-23-81* Нормы проектирования. Стальные конструкции. -М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. - 96 с.
7. СНиП 2.01.07 - 85* Нагрузки и воздействия. М.: Минстрой России, 1996.-43 с.
8. Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. - Вып. 4. - М.: Стройиздат, 1964. - 360 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

I. Сравнение двух вариантов несущих конструкций каркаса одноэтажного производственного здания по критериям металлоемкости и стоимости "в деле"
Задание: отапливаемое однопролетное здание (пролет 24 м, длина 60 м, отметка низа ригеля 10 м), оборудованное подвесными кранами грузоподъемностью 1 т, в г Новосибирске (расчетная низкая температура $t = -39^{\circ}\text{C}$; снеговой район-4). Конструктивное решение варианта № 1

Пролет здания перекрывается стропильными фермами, которые с шагом 6 м опираются на подстропильные фермы или колонны (рис. 3.2,а). Пролет подстропильных ферм и, соответственно, шаг колонн - 12 м. Стропильные фермы с параллельными поясами и сечением стержней из прокатных тавров. Решетка ферм треугольная с дополнительными стойками из двух прокатных уголков (рис. 3.2, 2-2).

Под стропильные фермы треугольного очертания с поясами из тавров. По стропильным фермам уложены прогоны и стальной профилированный настил (рис. 3.5).

К нижним поясам стропильных ферм крепятся монорельсы (для передвижения подвесных кранов). Колонны каркаса - из прокатных двутавров. Конструктивное решение варианта № 2

Стропильные фермы пролетом 24 м опираются с шагом 4 м на подстропильные фермы или на колонны (рис. 3.7). Шаг колонн (пролет подстропильных ферм) - 12 м. Все фермы с параллельными поясами, решетка треугольная, сечения стержней гнутосварные прямоугольные трубы (рис. 3.7, 3.8). Непосредственно по верхним

поясам стропильных ферм уложен стальной профилированный настил. К нижним поясам стропильных ферм крепятся монорельсы. Колонны - из прокатных двутавров.

Ставится задача: на основе методики, изложенной в [2], рассчитать металлоемкость и стоимость "в деле" несущих конструкций каждого из вариантов и выбрать наиболее экономичный.

II. Сравнение двух вариантов несущих конструкций рабочей площадки по критерию металлоемкости

Задание: рабочая площадка, расположенная внутри отапливаемого производственного здания (рис. 2.2,б). Пролет главных балок 12 м, пролет второстепенных балок 6 м, отметка верха рабочей площадки 8 м, длина площадки 30 м. Технологи-ческая нагрузка на рабочую площадку 30 кН/м^2 .

Конструктивное решение варианта № 1

Поперечное сечение главных балок - сварной симметричный двутавр (рис. 2.1). Главные балки шарнирно опираются на колонны. Второстепенные балки из прокатных двутавров или швеллеров (рис. 1.1,в,д) шарнирно опираются на главные балки с шагом $a=1,5\text{ м}$. Колонны выполнены из прокатных двутавров с параллельными гранями полок (рис. 1.1,е) и жестко защемлены в фундаментах. Расчетная схема колонны - на рис. 2.12.

Конструктивное решение варианта № 2

Поперечное сечение главных балок - замкнутое в виде сварной симметричной "коробки" из четырех листов (рис. 2.3д).

Второстепенные балки из прокатных двутавров опираются на главные с шагом $a=2$ м. Опирание и главных и второстепенных балок шарнирное. Колонны - из круглых труб, расчетная схема которых аналогична первому варианту.

Ставится задача: на основе указаний данного учебного пособия (п.п. 2.1.2, 2.1.3 и 2.2.2), а также [1, 6] определить металлоемкость несущих конструкций рабочей площадки, сделать выводы о влиянии формы поперечного сечения несущих элементов на расход металла и выбрать оптимальный по расходу металла вариант.

Подписано в печать 25.03.18 Формат 84x108/32
Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Бумага мелованная. Усл. Печ. л. –3,15
Тираж 50 экз.

Издательство Современного технического университета
390008, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.
(4912) 300630, 30 08 30