

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Мосты и тоннели»

## **МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Пособие для студентов специальности  
7-07-0732-03 «Строительство транспортных коммуникаций»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области строительства и архитектуры*

Минск  
БНТУ  
2024

УДК 624.014.2  
ББК 38.54.74  
М54

С о с т а в и т е л ь :  
*С. В. Шевченко*

Р е ц е н з е н т ы :  
директор ООО «ЭКОМОСТ» *А. М. Першай*;  
канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Химическая технология  
вяжущих материалов», БГТУ *А. А. Мечай*

**Металлические** конструкции в транспортном строительстве: пособие для  
М54 студентов специальности 7-07-0732-03 «Строительство транспортных ком-  
муникаций» / сост.: С. В. Шевченко. – Минск : БНТУ, 2024. – 52 с.  
ISBN 978-985-31-0047-1

В пособии приведены указания по расчету и конструированию легких метал-  
лических конструкций для транспортного строительства по дисциплине «Строи-  
тельные конструкции в транспортном строительстве» для студентов специальности  
7-07-0732-03 «Строительство транспортных коммуникаций» факультета транспорт-  
ных коммуникаций.

УДК 624.014.2  
ББК 38.54.74

ISBN 978-985-31-0047-1

© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	5
1.1. Характеристика и экономическая эффективность ЛМК .....	5
1.2. Особенности проектирования зданий из ЛМК .....	7
2. НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ ИЗ ЛМК .....	14
2.1. Общая характеристика .....	14
2.2. Конструкции покрытий с применением ферм из круглых и прямоугольных труб .....	17
2.3. Облегченные рамные конструкции .....	20
2.3.1. Сплошностенчатые рамы коробчатого сечения типа «Орск» .....	20
2.3.2. Сплошностенчатые рамы типа «Канск» .....	21
2.3.3. Рамы с элементами, имеющими перфорированные стенки .....	22
3. РЕШЕТЧАТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ .....	23
3.1. Общая характеристика .....	23
3.2. Цилиндрические оболочки .....	26
3.3. Купола .....	26
3.4. Пологие оболочки .....	30
3.5. Конические оболочки .....	31
3.6. Складки .....	31
3.7. Гипары .....	32
3.8. Плоские структурные плиты .....	33
3.9. Складчатые листовые конструкции .....	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	49
ЛИТЕРАТУРА .....	50

## ВВЕДЕНИЕ

Легкими или облегченными конструкциями называют основные несущие элементы и системы – балки, фермы, колонны, рамы и др., у которых благодаря рациональной конструктивной форме, оптимальным размерам сечений, использованию сталей повышенной и высокой прочности металлоемкость существенно снижена по сравнению с традиционными конструкциями – сварными двутаврами с гибкостью стенки 100–120, фермами со стержнями из парных уголков и узловыми фасонками и т. д.

С начала 1970-х годов в бывшем СССР легкими металлическими конструкциями (далее – ЛМК) стали называть несущие и ограждающие конструкции в зданиях с пролетами до 30 м без кранов (для производственных и гражданских объектов) с подвесным транспортным оборудованием с грузоподъемностью до 50 т или мостовыми кранами грузоподъемностью до 50 т (для производственных объектов). Суммарная масса несущих и ограждающих конструкций в таких зданиях в расчете на 1 м<sup>2</sup> ограждающей поверхности (включая защитные покрытия) не должна превышать 100–150 кг.

Необходимость широкого внедрения в практику отечественного строительства ЛМК обуславливается рядом факторов, главным из которых является общее уменьшение массы и ускорение строительства объектов. Эти факторы существенно влияют на все показатели строительного производства, в том числе: на транспортные затраты при перевозке материалов, конструкций и изделий; на продолжительность строительства; на трудоемкость и, как следствие, на стоимость изготовления и монтажа.

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. Характеристика и экономическая эффективность ЛМК

Основные характерные черты легких металлических конструкций: малая металлоемкость; существенная типизация и унификация; стабильность номенклатуры в течение достаточно длительного времени; высокая технологичность и приспособленность для изготовления на поточных автоматизированных линиях, для транспортировки, а также для конвейерно-блочных и других скоростных методов монтажа; высокая степень заводской готовности; возможность комплектной поставки целых зданий-модулей или их несущих конструкций. Следствием вышеперечисленных особенностей легких металлических конструкций являются хорошие технико-экономические показатели.

Накопленный за последние 10–15 лет отечественный опыт строительства зданий с использованием ЛМК позволяет оценить эффективность их применения и характеризуется следующими основными технико-экономическими показателями:

1. Материалоемкость зданий (с учетом массы фундаментов) снижается в 2–3 раза. Расход металла, например, на 1 м<sup>2</sup> покрытия типа КЖС (крупноразмерные железобетонные плиты-панели) и системы типа «Молодечно» одинаков (29 кг), но масса покрытия типа КЖС в 4 раза больше (соответственно 400 и 110 кг на м<sup>2</sup> покрытия). Общий расход металла на современные комплектные здания из ЛМК колеблется в пределах 30–100 кг/м<sup>2</sup> (в зависимости от назначения и природно-климатических условий), в то же время как традиционные металлоконструкции имеют в этих же условиях массу от 150 до 300 кг/м<sup>2</sup>.

2. На 20–50 % сокращаются сроки строительства.

3. В 1,5–2 раза уменьшается трудоемкость.

4. Производительность труда при изготовлении ЛМК методами поточного производства в 1,5–2 раза выше, чем производительность труда на заводах традиционных металлоконструкций.

5. На 30–40 % сокращаются суммарные транспортные затраты.

6. Примерно на 8–10 % снижается стоимость строительства.

Массовое производство ЛМК комплектной поставки в СНГ потребовало создания поточного машинного производства специаль-

ных экономичных профилей и типовых элементов зданий, в том числе: автоматизированных линий по производству профилированного настила для покрытий и стеновых трехслойных панелей с эффективными утеплителями, автоматизированной линии по производству прямоугольных электросварных труб для изготовления конструкций типа «Молодечно», поточных линий по производству рамных конструкций типов «Орск» и «Канск», линий по производству тонкостенных профилей из алюминиевых сплавов методом экструзии, автоматизированных линий окраски в электростатическом поле.

Объемы ежегодного производства наиболее массового типа ЛМК – «Молодечно» увеличивались с 400 тыс. м<sup>2</sup> в 1981 г. до 2–3 млн в 2020 г. Специализированные бригады монтируют здания-модули площадью 1000 м<sup>2</sup> за несколько недель. ЛМК находят все большее применение для строительства гражданских объектов, в том числе физкультурно-оздоровительных комплексов и других зданий социального значения, а также рыночных торговых павильонов.

Для гражданских объектов предпочтение необходимо отдавать зданиям из ЛМК с наиболее выразительной архитектурной формой (например, зданиям с покрытиями в виде решетчатых оболочек, складок, структур и т. п.). К сожалению, большинство современных зданий из ЛМК комплектной поставки внешне маловыразительны.

Несмотря на преимущества легких металлических конструкций, особенно для промышленных зданий комплектной поставки, на их долю в общем объеме капитального строительства в СНГ в 90-х годах приходилось не более 15 % (в США – 50 %, в Великобритании – 42 %, в Швеции более 50 %).

Анализ технико-экономических показателей производственных зданий из ЛМК и зданий с традиционным железобетонным каркасом свидетельствует о том, что расход стали на 1 м<sup>2</sup>, приведенный к стали С235, в первых составляет 40–110 кг, в железобетонных же каркасах он меньше в 1,5–2,5 раза, однако трудоемкость изготовления и монтажа, продолжительность монтажа металлических конструкций ниже на 20–40 %. В результате эффект от применения легких металлических конструкций (из расчета на 1 м<sup>2</sup> площади здания) составляет в промышленности 1–10 у.е. Именно это и предопределяет дальнейшее развитие легких металлических конструкций в Республике Беларусь.

## 1.2. Особенности проектирования зданий из ЛМК

Промышленные здания из ЛМК предназначены для размещения производств с нормальным температурно-влажностным режимом при отсутствии агрессивных выделений или для производств со слабоагрессивными средами, но при соответствующей антикоррозионной защите. Для зданий, где в технологических процессах используются или производятся твердая щелочь, сода или другие соли со щелочной реакцией, а также при наличии в процессе производства пыли, содержащей медь, ртуть или их соединения, которые вызывают контактную коррозию, применение ЛМК не допускается. Ограждающие конструкции зданий из ЛМК необходимо проектировать с таким расчетом, чтобы исключить образование конденсата на внешних поверхностях стен и покрытий.

Применение легких металлических несущих и ограждающих конструкций допускается при выполнении ряда противопожарных требований. Варианты сочетания групп возгораемости строительных конструкций и материалов и минимальные пределы огнестойкости основных строительных конструкций приведены в таблице 2.1.

Запрещается проектировать в зданиях из ЛМК встроенные площадки и антресоли для размещения складских помещений. Масляные трансформаторы и распределительные устройства с маслом наполненным оборудованием, кондиционеры с масляными фильтрами следует размещать у наружных стен в помещениях с выходом непосредственно наружу с глухими несгораемыми ограждающими конструкциями (стены, перекрытия), имеющими предел огнестойкости не менее 0,75 ч. Наружные стены здания над этими помещениями должны быть выполнены из несгораемых материалов на высоту 4 м или до покрытия, или отделяться несгораемым козырьком, выступающим за плоскость стены не менее чем на 1 м.

Для определения наименьших расстояний между зданиями и сооружениями здания из ЛМК условно отнесены к зданиям III степени огнестойкости.

Таблица 2.1

Группы возгораемости строительных конструкций и материалов.  
Минимальные пределы огнестойкости (в часах)  
основных строительных конструкций

Варианты сочетаний	Несущий каркас (колонны, фермы и др. к-ции каркаса)	Настил покрытия и обшивка наружных стен	Утеплитель	
			стен	покрытий
а	несгораемый 0,25	несгораемые	трудно-сгораемый	трудно-сгораемый
б	несгораемый 0,25	несгораемые	трудно-сгораемый	сгораемый
в	несгораемый 0,25	несгораемые	сгораемый	сгораемый

*Примечания:*

1. Подшипник полного заполнения не имеет сепаратора. Вариант сочетаний «а» допускает применение обшивки наружных стен из алюминия.

2. Наружные стены из трехслойных панелей с алюминиевыми или стальными обшивками и утеплителем из пенополиуретана с пламегасящими добавками условно относят к вариантам сочетаний «а», «б» в зависимости от группы возгораемости утеплителя покрытия.

3. Покрытия из профилированного стального настила, утеплителя из пенополистирола (ПСБ-С), рулонной кровли с защитным слоем из гравия или щебня принимаются условно по варианту сочетаний «а».

Площадь этажа между противопожарными стенками следует принимать по таблице 2.2.

Таблица 2.2

Площадь этажа между противопожарными стенами  
производственных зданий из ЛМК (м<sup>2</sup>)

Категория производств	Варианты сочетаний (по табл. 2.1)	Без установок автоматического пожаротушения		С установками автоматического пожаротушения	
		1-этажн.	2-этажн.	1-этажн.	2-этажн.
А, Б	а	не допуск.	не допуск.	5 200	3 500
	б	не допуск.	не допуск.	3 500	2 600
	в	не допуск.	не допуск.	не допуск.	не допуск.
В	а	5 200	3 500	не огранич.	не огранич.
	б	3 500	2 600	не огранич.	25 000
	в	2 600	2 000	25 000	18 000
Г, Д	а, б, в	не огранич.	не огранич.	–	–
Е	а, б, в	не огранич.	не огранич.	–	–

*Примечания:*

1. Площадь этажа между противопожарными стенами в зданиях с производственными категориями А, Б, В с применением горючих и легковоспламеняющихся жидкостей не ограничивается, если используются быстродействующие установки автоматического тушения пожаров, исключающие возможность распространения огня за пределы участка возгорания и обеспечивающие тушение огня до наступления пределов огнестойкости несущих конструкций, указанных в табл. 2.1.

2. Площадь этажа между противопожарными стенами в зданиях шириной более 60 м, не имеющих световых или аэрационных фонарей, с производством категории В, при применении установок автоматического пожаротушения следует принимать не более: для одноэтажных зданий – 25 000 м<sup>2</sup>; для двухэтажных – 18 000 м<sup>2</sup>.

3. Установки автоматического пожаротушения для отдельных помещений или участков следует проектировать в соответствии с перечнями помещений, утвержденными министерствами и ведомствами.

4. При применении стальных конструкций для колонн первого этажа и перекрытий над первым этажом в двухэтажных зданиях с производствами категорий А, Б, и В следует предусматривать их огнезащиту в соответствии со СНиП II-2-80 «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений».

Площадь между противопожарными стенами одноэтажных зданий складов следует принимать по таблице 2.3.

Таблица 2.3

Площадь этажа между противопожарными стенами складских зданий (м<sup>2</sup>)

Категория производства	Варианты сочетаний (по табл. 2.1)	Без установок автоматического пожаротушения	С установками автоматического пожаротушения
А, Б	а	не допуск.	3 500
	б	не допуск.	2 200
	в	не допуск.	не допуск.
В	а	3 500	20 000
	б	2 600	15 000
	в	1 500	10 000
Д	а, б, в	не огранич.	–
Е	а, б, в	не огранич.	–

*Примечание:*

Складские здания со стеллажами высотой более 5,5 м с категориями производств А, Б, В следует проектировать только со специальными установками автоматического пожаротушения.

Расстояние от наиболее удаленного рабочего места до ближайшего эвакуационного выхода из здания принимают согласно таблице 2.4.

Таблица 2.4

Расстояние от наиболее удаленного рабочего места до ближайшего эвакуационного выхода (м)

Категория производств	В 1-этажн. зданиях	В 2-этажн. зданиях
А	40	30
Б	50	40
В	50	40
Г, Д	80	60
Е	60	40

*Примечания:*

1. В одноэтажных зданиях с производством категорий В, Г, Д при невозможности соблюдения расстояний, указанных в таблице, эвакуационные выходы необходимо располагать по периметру здания не реже, чем через 72 м.

2. Расстояния, указанные в таблице, допускается увеличивать на 50 %, если площадь пола помещения на одного работающего в наиболее многочисленной смене составляет 75 м<sup>2</sup> и более.

При проектировании зданий из ЛМК следует выполнять специальные противопожарные мероприятия.

По кровельному сгораемому ковру покрытий производственных зданий необходимо предусматривать защитный слой из гравия или щебня толщиной 20 мм по слою мастики толщиной 2 мм.

В покрытиях зданий пустоты ребер профилированного настила необходимо заполнять на длину 250 мм несгораемым материалом (минеральной ватой и т. п.) в местах примыкания настила к стенам, деформационным швам, стенкам фонарей, а также с каждой стороны конька и ендовы (для предотвращения вытекания горячей битумной мастики при пожаре). Перечисленные требования не распространяются на конструкции покрытий, в которых ребра настила полностью заполнены теплоизоляционным материалом.

В конструкциях стен полистовой сборки надлежит применять трудносгораемый утеплитель. Подвесные потолки, изоляция оборудования, воздухопроводов и трубопроводов, расположенных в пределах несущих конструкций покрытия, выполняются из несгораемых материалов.

Цоколь наружных стен проектируется из легкобетонных панелей или кирпича высотой не менее 0,9 м от отметки уровня чистого пола здания.

Проекты производства кровельных работ должны содержать указания о недопустимости заливки полости профилированного настила битумной мастикой при наклейке пароизоляционного слоя, превышения нормативного расхода битума, особенно при устройстве ендов, а также предусматривать укладку защитного слоя гра-вия непосредственно за наклейкой рулонного ковра.

В покрытиях зданий из ЛМК для защиты от увлажнения теплоизоляционного слоя предусматривается пароизоляция (ниже теплоизоляционного слоя) или вентилируемые наружным воздухом прослойки и каналы.

Применение зданий из ЛМК для размещения производств со среднеагрессивными средами допускается только при условии защиты несущих конструкций от коррозии способом горячего цинкования, который обеспечивает толщину покрытия 60–100 мкм с последующей окраской лакокрасочными материалами. Для производств с сильноагрессивными средами применение зданий с ЛМК не допускается.

Нельзя проектировать стальные конструкции из сталей С345 и С375 для производств со среднеагрессивными средами, а из стали С440 – со среднеагрессивными, содержащими сернистый ангидрит или сероводород. Алюминиевые конструкции не следует применять для производств со среднеагрессивными средами, содержащими хлор, хлористый водород или фтористый водород.

Стальные конструкции с соединениями на высокопрочных болтах марки 38ХС не допускается проектировать для зданий, в которых размещены производства со среднеагрессивными средами.

Минимальная толщина листов ограждающих конструкций, применяемых без защиты от коррозии, приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Минимальная толщина листов ограждающих конструкций (мм),  
применяемых без защиты от коррозии

Степень агрессивного воздействия среды	Из алюминия	Из оцинкованной стали	Из стали С345К
неагресс.	не огранич.	0,5	0,6
слабоагресс.	не огранич.	0,8	0,8
среднеагресс.	1*	не применяется	не применяется без защиты от коррозии

*Примечание:*

Толщина, обозначенная знаком «\*» – для алюминия марок АД1М, АМцМ, АМг2М (алюминий других марок без защиты от коррозии не применяется).

Горячее цинкование методом погружения в расплав следует предусматривать для защиты от коррозии стальных конструкций с болтовыми соединениями (кроме соединений на высокопрочных болтах), конструкций из незамкнутого профиля со стыковой сваркой и угловыми швами, а также болтов, шайб, гаек. Вместо горячего цинкования стальных конструкций для мелких элементов допускается предусматривать гальваническое цинкование или кадмирование с последующим хромированием.

Монтажные сварные швы соединений конструкций производственных зданий должны быть защищены металлизацией цинком.

ЛМК комплектной доставки наиболее рационально использовать (с соответствующим технико-экономическим обоснованием) при проектировании и строительстве одноэтажных отапливаемых зданий предприятий машиностроения, приборостроения, легкой, пищевой, мясо-молочной, радиоэлектронной, деревообрабатывающей промышленности, сельскохозяйственных зданий, зданий технического обслуживания автотранспорта и сельскохозяйственных машин, зданий компрессорных, производственно-отопительных котельных, павильонов для демонстраций сельхозтехники и т. п., а также в случаях, когда сокращение сроков строительства позволяет получить значительный экономический эффект.

## 2. НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ ИЗ ЛМК

### 2.1. Общая характеристика

Применяемые в практике строительства системы несущих конструкций для легких одноэтажных зданий можно разделить на следующие основные группы:

а) плоскостные рамные системы, которые состоят из защемленных в фундаментах стоек и шарнирно-соединенных с ними стропильных элементов (например, конструкции типа «Молодечно», «Урал» и т. п.);

б) плоскостные рамные системы, состоящие из жестких рам, жестко или шарнирно-соединенных с фундаментом (например, конструкции типа «Орск», «Канск», «Плауэн»);

в) здания с пространственными решетчатыми стержневыми системами покрытий (например, системы типа «ЦНИИСК», «Берлин», «Кисловодск» и т. п.);

г) здания с покрытием в виде сетчатых цилиндрических оболочек, сетчатых куполов, сетчатых конических оболочек и т. п.;

д) пространственные складчатые конструкции, в которых стальные профилированные листы-складки совмещают функции несущих и ограждающих конструкций (например, арочные здания-оболочки из лоткообразных элементов системы «СМО Omega» (Франция) или «Knudsen Ltd» (США));

е) здания с легкими балками и колоннами.

Утвержденными габаритными схемами типовых и рекомендованных для применения легких металлических конструкций (для групп а–в) предусматривается для зданий комплектной поставки шаг колонн 6 или 12 м по крайним рядам и 12 м по средним.

Конструкции зданий со стропильными фермами рассчитаны для строительства в I–IV районах снеговой и ветровой нагрузок.

Структурные конструкции покрытий из труб (размером 24×12 м) рассчитаны для строительства в I и II районах снеговых нагрузок, а размером 18×12 м – также и в III снеговом районе. Эти здания можно возводить в I–IV ветровых районах. Пространственные решетчатые конструкции покрытий из труб могут быть применены при строительстве здания в I–IV районах снеговых и ветровых нагрузок.

Типовые конструкции коробчатого сечения рассчитаны на I–III снеговой и I–IV ветровой районы.

Грузоподъемность кранов для производственных зданий в указанных габаритных схемах принята равной:

а) со стропильными фермами – подвесные для крана по 2 т или один 3,2 т и мостовые – до 20 т при среднем режиме работы;

б) со структурными конструкциями из труб – только мостовые до 10 т при среднем режиме работы;

в) с пространственными решетчатыми конструкциями из труб – подвесные краны: один до 2 т или два по 1 т (для сетки 12×24 м);

г) с рамными конструкциями коробчатого сечения – мостовые ручные краны до 3 т (для пролета 18 м при высоте для низа несущих конструкций 6,36 м) и 5 т – при среднем режиме работы (для пролета 18 м при высоте до низа несущей конструкции 7,56 м, а для пролета 24 м – при высоте до низа несущей конструкции 7,53 м).

В зданиях из ЛМК перепады высот обычно не допускаются; фонарные надстройки, как правило, не предусматриваются. Вместо них возможна установка зенитных фонарей.

Несущие типовые легкие стальные конструкции разработаны для применения в однопролетных и многопролетных зданиях. Исключением являются рамные конструкции коробчатого сечения, которые предназначены только для однопролетных зданий.

Легкие несущие элементы (балки, фермы, колонны, структуры и т. п.), изготавливаемые поточным методом, применяются как составные части каркасов в зданиях тяжелого машиностроения, металлургии, авиа- и судостроения и т. п., таким образом, имеют область распространения значительно более широкую, чем в легких каркасных зданиях комплектной поставки.

За годы развития ЛМК в СНГ определилась номенклатура их несущих элементов и систем. Разработан ряд типовых проектов, выпускаются каталоги конструкций комплектной поставки. Последние постоянно совершенствуются, появляются их новые формы.

Облегчение балок достигается в основном за счет снижения расхода металла на стенки (толщина стенки уменьшается в 2–4 раза) за счет использования закритической стадии работы этих элементов. Местная устойчивость стенок может повышаться путем гофрирования стенки. Также в последнее время широко используются балки и рамы с перфорированной стенкой.

Облегчение ферм осуществляется в основном за счет отказа от значительной части фасонок и «сухарей» в их конструкции. Использование одиночных уголков, холодногнутых труб прямоугольного сечения, тавров, двутавров с параллельными гранями полок обеспечивает снижение трудозатрат на изготовление ферм по сравнению с традиционными конструкциями стержней из парных уголков и фасонок. Применение замкнутых сечений – круглых и прямоугольных труб – обеспечивает дополнительную экономию металла и более эффективное использование сталей повышенной и высокой прочности в сжатых и сжато-изогнутых стержнях. Кроме того, фермы из замкнутых стержней обладают повышенной устойчивостью при монтаже.

Колонны для зданий без кранов, с подвесными кранами грузоподъемностью до 20 т изготавливаются в основном из сварных или широкополочных прокатных двутавров. Находят применение колонны из круглых электросварных труб (в основном для зданий с покрытием из структурных плит). Весьма перспективно использование для колонн и стоек фахверка гнутых прямоугольных труб, тонкие стенки которых можно подкрепить штампованными продольными рифами.

Стержневые элементы из гнутых профилей могут иметь различную форму поперечного сечения и компоноваться из одного, двух или нескольких профилей.

Гнутые профили для строительства поставляют в соответствии с сокращенным сортаментом, несмотря на более широкую номенклатуру гнутых профилей, выпускаемых черной металлургией для других отраслей народного хозяйства. В этот сортамент включены гнутосварные профили квадратного и прямоугольного замкнутых сечений из листовой стали толщиной от 3 до 8 мм. Максимальный размер стороны сечения – 200 мм, минимальный – 80 мм. Гнутые равнополочные профили С-образного сечения высотой 400 мм изготавливают из листовой стали толщиной 3 или 4 мм. Более широкой является номенклатура гнутых равнополочных швеллеров высотой от 60 до 200 мм, изготавливаемых из листовой малоуглеродистой стали толщиной от 3 до 5 мм. Гнутые швеллеры из низколегированной стали поставляют высотой до 280 мм. Ограниченный сортамент гнутых профилей пока не позволяет эффективно их использовать в несущих элементах конструкций.

Материалом для изготовления стержневых холодногнутых профилей может быть листовая сталь толщиной 1,5–20 мм с пределом текучести от 250 до 630 МПа, но обычно применяется сталь толщиной менее 8 мм с пределом текучести не более 350 Мпа. Сталь должна обладать достаточной пластичностью, чтобы исключить образование трещин в местах сгиба с малым радиусом. Для оценки пластичности используются экспериментальные данные, полученные при испытаниях образцов стали на разрыв (отношение временного сопротивления к пределу текучести и относительное удлинение на базе 50 мм). Механические свойства материала гнутых профилей после их изготовления изменяются: предел текучести стали в профилях изготовленных холодной прокаткой, возрастает на 10–25 %, причем упрочнение происходит в большей степени в угловых зонах, чем на плоских участках.

Защиту гнутых профилей в стержневых конструкциях от коррозии производят обычно горячим цинкованием или окрашиванием. Атмосферостойкая сталь для изготовления стержневых гнутых элементов в мировой строительной практике используется редко (в основном для конструкций, используемых в агрессивных средах).

Эффективность применения легких металлических конструкций определяется рядом факторов. Важнейшее значение имеет показатель снижения расхода металла. Последний характеризуется массой самого конструктивного элемента и, кроме того, общим расходом металла на единицу площади зданий, включая все элементы каркаса: стропильные и подстропильные конструкции, прогибы, колонны, связи и другие элементы. Учитывается масса металла, израсходованного на ограждающие конструкции. Эффективность оценивается также по трудозатратам на изготовление и монтаж конструкций, в том числе и на один сопоставимый элемент, а также на единицу площади (на 1 м<sup>2</sup>).

## **2.2. Конструкции покрытий с применением ферм из круглых и прямоугольных труб**

Основные преимущества ферм из круглых и прямоугольных труб связаны с особенностями замкнутой формы сечения стержней. В трубах относительно большие радиусы инерции, в десятки раз большая по сравнению с открытыми сечениями жесткость на кру-

чение, допустима большая тонкостенность. Это позволяет более эффективно использовать металл в сжатых и внецентренно сжатых стержнях, особенно из стали повышенной и высокой прочности. Кроме того, трубы коррозионностойки (при условии герметизации внутренней полости), т. к. имеют меньшую поверхность, подвергающуюся коррозии, в их сечении нет конструктивных концентраторов коррозии в виде углов и других изменений сечения. Трубы имеют хороший доступ для внешнего осмотра и окраски (благодаря этому снижаются эксплуатационные расходы). В трубчатых фермах можно осуществить сопряжение стержней без фасонки. Помимо экономии металла, такое сопряжение обеспечивает большую устойчивость ферм на монтаже и возможность отказа от расчалок. Наконец, трубчатые фермы обладают приятным внешним видом.

Трубы прямоугольного или квадратного сечения обладают рядом преимуществ по сравнению с элементами круглого сечения: радиусы инерции при одинаковой площади сечения больше у прямоугольных, чем у круглых; к прямоугольным трубам проще присоединить раскосы и стойки ферм, т. к. не требуются сложные фигурныерезы; на прямоугольные трубы-пояса фермы удобно опирать прогоны и настил.

Наиболее эффективны гнутосварные прямоугольные трубы, особенно при толщине стенки 3–4 мм, т. е. при сравнительно небольших усилиях в стержнях. Такие профили изготавливаются на Молодечненском заводе легких металлических конструкций на высокопроизводительном оборудовании путем последовательного сворачивания стальной полосы сначала в круглую трубу, затем сварки ее продольным швом и превращения в прямоугольную трубу на обжимном стане.

С ростом усилий толщина стенок в прямоугольных трубах-поясах увеличивается. В этих условиях с гнутосварной трубой может конкурировать сварная труба прямоугольного сечения из двух прокатных уголков или швеллеров. Возможен вариант сварных прямоугольных труб из гнутых уголков или швеллеров (при отсутствии элементов из холодногнутых сварных профилей прямоугольного сечения).

При проектировании современных зданий из ЛМК уклон верхних поясов строительных конструкций и уклон кровли обычно назначается не менее 3–5 %, т. к. при меньших уклонах происходит

скопление дождевой и талой воды на кровле в местах максимального прогиба листов стального профнастила. Увеличение уклона путем устройства дополнительного слоя утеплителя или цементной стяжки недопустимо, т. к. это приводит к перегрузке элементов покрытия.

В последние годы получили большое распространение фермы типа «Молодечно» из гнutosварных прямоугольных труб. Фермы имеют пролеты 18, 24 и 30 м (типовая серия 1.460-3-14), высоту 2 000 мм и уклон 1,5 (3) %. Фермы с пролетами 18 и 24 м komponуются из двух отпpавочных марок, пролетом 30 м – из трех. Решетка треугольная. В узлах предусмотрено непосредственное сопряжение раскосов с поясами. Монтажные соединения – на фланцах.

Верхние пояса изготавливаются из гнutosварных труб 180×140 мм с толщиной стенки 4–8 мм; нижние пояса – из труб 140×140 мм с такой же по толщине стенкой из низколегированной стали С345; раскосы из труб – 120×120 мм толщиной 4–6 мм и труб 100×100 мм с толщиной 3–5 мм из стали С235. Соотношение между шириной раскосов и поясов составляет 0,72–0,86, зазоры между гранями поясов и раскосов – 10–20 мм.

В унифицированных каркасах комплектной поставки с применением легких металлических конструкций «Молодечно» профилированный настил, прикрепленный к верхним поясам стропильных ферм самонарезающими винтами, образует в уровне верхних поясов стропильных ферм жесткий диск, который обеспечивает неизменяемость покрытия в горизонтальной плоскости, поэтому горизонтальные связи по покрытию устанавливаются только в уровне нижних поясов ферм.

Покрытие в таких зданиях – беспрогонное. Шаг стропильных конструкций принимается обычно 4 или 6 метров. При шаге строительных конструкций 6 м используется стальной профнастил с высотой гофров 114 мм. Недосток такого настила – повышенная деформативность на стадии монтажа. При установке комбинированных заклепок, соединяющих листы настила друг с другом, необходимо предусматривать меры по предотвращению деформирования крайних гофров (например, установить временные промежуточные опоры для настила во время установки заклепок).

## 2.3. Облегченные рамные конструкции

В мировой строительной практике широко распространены легкие рамы пролетом 12–30 м из сплошностенчатых элементов в основном двутаврового сечения, однопролетные или многопролетные бесшарнирные, двухшарнирные и трехшарнирные. Сопряжение стоек и ригелей в таких рамах, как правило, жесткое.

Замена сквозного ригеля в виде стропильной фермы на сплошностенчатый объясняется целым рядом преимуществ последнего: уменьшенная в 1,5–2,5 раза высота, что обеспечивает уменьшение объема здания и, следовательно, расходов на стеновое ограждение и отопление; более высокая технологичность изготовления, чем у ферм; существенно большая доля автоматической сварки; высокая транспортабельность (загрузка в вагоны достигает 80 %); большая устойчивость при монтаже, чем у ферм.

Есть у сплошностенчатых ригелей и недостатки: они более металлоемки, чем сквозные. Кроме того, для пропуска различных коммуникаций в их стенке необходимо предусматривать специальные отверстия.

Металлоемкость рам можно снизить за счет применения жестких схем (защемления ригелей); облегченных стенок (тонких, перфорированных и гофрированных); переменных сечений, размеры которых устанавливаются методами оптимального проектирования.

В СНГ в качестве типовых легких рамных конструкций получили распространение две системы – рамы типов «Орск» и «Канск».

### *2.3.1. Сплошностенчатые рамы коробчатого сечения типа «Орск»*

Рамы типа «Орск», разработанные ЦНИИПСК (шифр 10076КМ) с использованием в качестве аналога конструкции рам типа «Плауэн» (Германия), получили название от города, в котором расположен завод металлических конструкций, изготавливающий эти рамы.

Рамы «Орск» имеют пролет 18 или 24 м, высоту 7–8 м, они однопролетные (если здание многопролетное, то каждый пролет перекрывается отдельной рамой, что является одним из недостатков этой серии).

Шаг рам предусмотрен до 6 м. Собираются они из двух элементов – «ног», шарнирно опирающихся на фундамент, и двух отпирочных марок ригеля. Пояса выполняются из прокатных или гнутых швеллеров. Высота сечения стойки и ригеля составляет до 1/12 от длины «ноги» или до 1/35 пролета. Сечения стоек и ригеля приняты постоянными по их длине.

Так как стенки сечения относительно тонкие (гибкость примерно равна 150), то для обеспечения их местной устойчивости листы усилены двумя продольными выштамповками.

Монтажные стыки выполняются на высокопрочных болтах в узлах рамы и в середине пролета – фланцевые (толщина фланцев 12 мм). В рамках предусматриваются консоли для опирания подкрановых балок под мостовые краны с грузоподъемностью 5–8 т.

Конструкция рам весьма технологична с точки зрения изготовления и монтажа. Замкнутое сечение обеспечивает большую жесткость на кручение и жесткость из плоскости рамы, что особенно важно при монтаже.

### ***2.3.2. Сплошностенчатые рамы типа «Канск»***

Рамы типа «Канск» (по названию города в Красноярском крае, где расположен завод металлоконструкций) имеют от одного до пяти пролетов (типовая серия 1.420.3-15) длиной 18 или 24 м, шаг рам – 6 и 12 м.

Рамы типа «Канск» приспособлены для подвесного кранового оборудования грузоподъемностью до 3 т или для мостовых кранов грузоподъемностью до 20 т. Для поддержки подкрановых балок предусмотрены специальные дополнительные стойки из гнутосварных прямоугольных труб, соединенных с рамой. Рамы выполняются из низколегированной стали марки С345. Стойки рам – из широкополочных двутавров, ригели – из сварных двутавров. Высота сечения ригеля составляет 920–960 мм или 1/19–1/26 пролета. Толщина стенки ригеля – 4–8 мм при гибкости стенки 225–112. Стенки ригеля укрепляются поперечными ребрами жесткости (фланцы также выполняют роль ребер жесткости).

В однопролетных рамах ригели и стойки жестко сопряжены, а в многопролетных рамах ригели через вуты жестко связаны с промежуточными стойками и шарнирно опираются на крайние

стойки. Стойки рам жестко сопряжены с фундаментом через опорную плиту толщиной 55 мм. Монтажные узлы сопряжений отдельных элементов выполнены на фланцах и высокопрочных болтах.

### ***2.3.3. Рамы с элементами, имеющими перфорированные стенки***

Для производственных зданий разработаны двухшарнирные рамы из двутавров с перфорированной стенкой постоянного сечения с пролетами 18 и 21 м. В зоне карнизного узлового сопряжения двутавры усилены накладками из полосовой стали, кроме того, изнутри здания узел усилен вутом, который выполняется из двутавра того же профиля. Высота сечения ригеля рамы составляет  $1/69$ – $1/26$  пролета.

Нашли применение трехшарнирные рамы из двутавров с перфорированной стенкой пролетом 18 и 21 м. Стенка ригеля и стоек имеет переменное сечение. Шаг рам 3 м. Соединение в углах рамы – фланцевое на высокопрочных болтах. Наружные или внутренние грани стоек рамы устанавливаются вертикально. Изготавливаются рамы по той же технологии, что и балки с перфорированной стенкой, т. е. стенка прокатного двутавра разрезается по зигзагообразной линии с помощью газорезки или методом прессования. Затем разрезанные части рам соединяются в местах примыкания выступов с помощью сварки, образуя сплошные перемычки.

Эффективность двутавра с перфорированной стенкой по сравнению с исходным объясняется тем, что высота сечения первого увеличивается в 1,4–1,6 раза, толщина стенки составляет  $1/75$ – $1/95$  от высоты сечения. Благодаря отверстиям в стенке экономится до 20–30 % материала. По трудоемкости изготовления они на 25–35 % эффективнее, чем сварные двутавры, за счет сокращения операций обработки и объема сварки. Недостаток – появление значительных температурных деформаций при кислородной резке двутавров. Область применения таких рам ограничивается несущей способностью элементов, образованных из прокатных двутавров, имеющих предельную высоту сечения.

### 3. РЕШЕТЧАТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

#### 3.1. Общая характеристика

Из коротких металлических стержней можно образовывать различные пространственные решетчатые конструкции, пригодные для перекрытия больших пространств. Такие конструктивные системы в последнее время получают широкое распространение, и их эффективно используют в плоских и криволинейных покрытиях общественных и производственных зданий.

Рассмотренные выше плоскостные системы (рамные или с применением стропильных ферм) состоят из отдельных несущих элементов, соединенных между собой легкими связями, не предназначенных для перераспределения нагрузки между несущими элементами. Приложенная к этим конструкциям нагрузка передается на опоры в одном направлении вдоль несущего элемента. В пространственных системах связи усиливаются и привлекаются к распределению усилий и передачи их на опоры.

В результате этого основные несущие элементы облегчаются, структура всей конструкции меняется. Приложенная к пространственной конструкции нагрузка передается в нескольких направлениях.

Пространственные конструкции могут быть плоскими (плиты) и криволинейными (оболочки). В пространственных сетчатых конструкциях принцип концентрации материала заменен принципом многосвязности системы, вследствие чего конструктивная форма пространственных систем существенно отличается от обычных плоскостных. Пространственная конструкция обычно получается легче плоскостной.

С 60-х годов XX столетия, когда были найдены рациональные решения схем и узлов ЛМК, решетчатые пространственные покрытия начали использоваться в мировой строительной практике, появились методы расчета на ЭВМ сложных многократно неопределимых конструкций.

Изготовление таких конструкций обычно связано с повышением трудоемкости и требует специальных приемов производства и монтажа, что являлось одной из причин ограниченного применения пространственных конструкций.

Применение пространственных решетчатых конструкций в современном строительстве позволяет добиваться ограниченного единства конструкции и архитектурной формы; создавать выразительные архитектурные решения внутреннего пространства и сооружения в целом; перекрывать помещения любой конфигурации в плане; существенно облегчать массу покрытия, повышая за счет этого эффективность работы конструкции на полезные временные нагрузки; за счет многократной повторяемости унифицировать элементы и узловые детали, обеспечивать возможность поточного изготовления их на высокомеханизированных заводах; удобно и легко транспортировать сборные элементы с завода-изготовителя к месту строительства; сводить работу на строительной площадке к простой и быстрой сборке элементов, имеющих небольшую массу.

Недостатками пространственных решетчатых систем покрытий считают повышенную трудоемкость изготовления элементов и сложность узлов по сравнению с традиционными решениями металлических конструкций.

Стержневые пространственные металлические конструкции появились во второй половине XIX века. Австрийский инженер-строитель Шведлер разработал купольные покрытия из стержней с шарнирными узлами. Первый его купол с диаметром 60 м был сооружен в 1874 г. в Вене. Из-за сложностей при изготовлении и монтаже купол Шведлера не получил широкого распространения. В 1882 г. Фепль предложил систему звездчатого купола и разработал метод его расчета. Со второй половины XX века такие купола очень широко применяют в строительной практике всего мира.

В начале 1920-х годов американский инженер Фуллер разработал систему многогранного купола с ромбической решеткой. В СССР независимо от Фуллера систему кристаллического купола разработал профессор М. С. Туполев (МАрХИ).

В 1930-х профессор А. М. Гинзбург предложил двухпоясную конструкцию большепролетных сводов и куполов, представляющих собой как бы изогнутую по заданной поверхности перекрестно-стержневую плиту.

Плоские решетчатые системы покрытий из коротких стержней появились в 1940-х годах. Французский инженер Ле Риколе построил из дерева первую перекрестно-стержневую конструкцию покрытия, назвав ее структурой (по аналогии со строением морских одно-

клеточных организмов, именуемых радиоляриями и состоящих из типовых повторяющихся форм). В 1942 г. Менгеринхаузенем в Германии предложено первое конструктивное решение металлической структуры. В 1944–1945 гг. Ваксманн по заданию американского правительства разработал перекрестно-стержневую конструкцию для ангара размером 116×236 м. Конструкция покрытия из стальных труб представляла собой горизонтально расположенную стержневую плиту с консольными свесами и опиранием в нескольких местах.

В целом все решетчатые пространственные конструкции можно разделить на две основные группы: перекрестно-стержневые конструкции и сетчатые оболочки.

Стержневая пространственная конструкция, узлы которой лежат на некоторой поверхности одинарной или двоякой кривизны, образуют сетчатую оболочку. В зависимости от формы поверхности различают сетчатые складки или цилиндрические оболочки, сетчатые купола, сетчатые конические оболочки и оболочки переноса. Последние называют еще оболочками двоякой кривизны (например, оболочка положительной гауссовой кривизны). В качестве поверхности переноса может использоваться эллиптический параболоид, круговая поверхность и т. п.

Другой тип стержневых пространственных конструкций – призматические конструкции и плиты. Здесь можно выделить трехгранные (трехпоясные) фермы и стержневые (структурные) плиты.

Стержневые пространственные конструкции могут быть однослойными (однопоясными), двухпоясными или многопоясными. Например, структурные плиты выполняют двухпоясными, сетчатые купола и цилиндрические оболочки при обычных пролетах делают однослойными.

Одним из признаков классификации стержневых конструкций является число взаимно пересекающихся осей стержней, лежащих в плоскости решетки; оно может быть равно двум (при прямоугольной решетке), трем (при треугольной решетке) и более. Различают такие ромбические, сотовые решетки и др.

В однослойных сетчатых оболочках следует применять только такие узловые соединения, которые обеспечивают жесткое защемление стержней в направлении нормалей к поверхности, так как иначе возможно «прощелкивание» узлов.

### 3.2. Цилиндрические оболочки

Сетчатой оболочкой называют пространственную стержневую конструкцию, узлы которой находятся на поверхности оболочки. Конструкции этого типа представляют собой, как правило, статически неопределимые системы, которые из конструктивных соображений, а также из условия обеспечения общей жесткости покрытия, выполняются в виде стержневых сеток с одинаковыми ячейками.

Простейшая сетчатая цилиндрическая оболочка образуется при изгибе плоской треугольной сетки в направлении одной из осей стержней. Чтобы обеспечить геометрическую неизменяемость системы, сетку закрепляют к торцевым элементам оболочки.

Наиболее проста сетка ромбического рисунка, которую можно получить из легких стандартных стержней. Просты и узлы сопряжения. Однако ромбическая сетка, не имеющая продольных элементов, не обеспечивает необходимой жесткости конструкции в продольном направлении. Такая конструкция работает как свод в поперечном направлении, передавая нагрузку на продольные стены. Распор свода должен восприниматься стенами или затяжками, соединяющими обвязки свода.

Стержни сетчатых оболочек могут быть из прокатных или штампованных (гнуемых) профилей, из труб, а в мощных сводах – из решетчатой конструкции по типу прутковых прогонов или фермочек небольшой высоты. Стержни составляют угол  $45\text{--}60^\circ$  с направляющей цилиндрической поверхностью. Цилиндрическая поверхность и регулярная сетчатая схема обеспечивают стандартность всех стержней и узлов, в чем заключается основное преимущество конструкции.

Жесткость конструкции при наличии в сетках продольных элементов существенно увеличивается, конструкция может работать как оболочка (без затяжек). Опорами оболочки могут служить торцевые стены или колонны (по углам сооружения) с торцевыми диафрагмами (связями).

### 3.3. Купола

Конструкции куполов бывают трех видов: ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые.

Купола представляют собой конструкцию с криволинейными (чаще круглыми, эллипсоидными) или многоугольными планами

и имеют криволинейное или многоугольное очертания в вертикальной плоскости.

Купола – простые и рациональные конструктивные формы – давно применяются в архитектуре и строительстве. Куполами перекрывают зальные помещения общественных зданий (планетарии, цирки, спортивные залы и т. п.) и некоторые виды промышленных сооружений с круглым планом (шламовые бассейны, радиальные сгустители и т. п.).

Основное преимущество куполов: они имеют поверхность двойной кривизны и поэтому эффективны в смысле статической работы. Сферический купол имеет минимальную поверхность при максимальной перекрываемой площади.

Отношение высоты купола к диаметру определяется в основном архитектурно-композиционными требованиями. Практика проектирования показывает, что при отношениях от  $1/4$  до  $1/7$  показатели массы конструкции изменяются незначительно. Очертание ребер купола из конструктивных соображений, как правило, принимают круговым. Однако часто центр окружности смещают с центральной оси вверх. В этом случае форма купола становится не сферической, а тороидально-стрельчатой. Для большепролетных куполов используют также эллиптическое очертание (в вертикальной плоскости).

Ребристые и ребристо-кольцевые купола, по существу, являются пространственными рамами. Наряду с продольными усилиями в их элементах возникают значительные изгибающие моменты.

Купольные системы, каркас которых образует пространственную стержневую систему с треугольными ячейками, называются сетчатыми куполами.

Конструкции ребристых куполов состоят из отдельных плоских или пространственных ребер, расположенных в радиальном направлении. Ребра купола могут быть сквозными в виде легких ферм или сплошного сечения. Ребра сплошного сечения тяжелее, но более просты в изготовлении, особенно при применении прокатных балок. В вершине купола обычно располагается кольцо, к которому примыкают ребра купола. Кольцо следует проектировать достаточно жестким, принимая во внимание его работу на сжатие, изгиб и кручение, т. к. пара ребер, расположенных в одной диаметральной плоскости и прерванная кольцом, рассматривается как единая арочная конструкция. При шарнирном прикреплении ребер к верхнему

кольцу и небольшом его диаметре можно считать, что ребра работают как трехшарнирные арки. Иногда кольцо раскрепляют внутренними распорками (при значительном диаметре кольца).

Ребристые купола являются распорными системами. Распор может быть воспринят конструкцией стен или специальным опорным (нижним) кольцом (металлическим или железобетонным). Ребристый купол при расчете на вертикальную симметричную относительно оси купола нагрузку может быть условно расчленен на отдельные плоские арки, каждая из которых воспринимает нагрузку с приходящейся на нее грузовой площади. Если распор купола воспринимается опорным кольцом, то кольцо может быть заменено условной затяжкой, находящейся в плоскости каждой пары ребер.

### **Конструктивные элементы, узлы и детали.**

Наиболее ответственным и сложным узлом конструкции куполов всех типов является узел присоединения ребер к нижнему кольцу и опирания кольца на нижележащие конструкции. Нижнее растянутое кольцо конструируется обычно в виде сварного (или прокатного) двутавра. В ребристых и ребристо-кольцевых куполах для увеличения изгибной жесткости кольца в горизонтальной плоскости двутавр располагается так, чтобы его стенка была параллельна горизонтальной плоскости. Сетчатые купола сами по себе имеют большую пространственную жесткость в горизонтальном направлении, поэтому при их проектировании опорное кольцо стремятся развивать по вертикали. Вертикальное расположение двутавра обеспечивает также максимальную жесткость на восприятие равномерно распределенных по кольцу радиальных крутящих моментов, которые вызывают в кольце изгиб относительно горизонтальной оси.

Узел должен быть правильно центрирован. Оси стержней купола, примыкающих к кольцу, и ось вертикальной опорной реакции должны пересекаться в горизонтальной плоскости, проходящей через центр тяжести кольца. При этом осевая линия кольца не обязательно должна проходить через центр узла. Фактический диаметр кольца может быть несколько уменьшен или увеличен.

Кольцо обычно шарнирно опирают на фундамент или вертикальные колонны. В большепролетных куполах желательно обеспечить свободу перемещений кольца в радиальном направлении. Это достигается использованием катковых опор или коротких качающихся стоек.

В сетчатых куполах стержни в каждом из узлов имеют различную пространственную ориентацию. В связи с этим при проектировании сетчатых куполов стремятся применять такие решения узловых соединений, которые обеспечивают возможность их использования не только при конкретных геометрических размерах, но и при отклонениях этих размеров на определенную величину. Этим требованиям, безусловно, удовлетворяет узел типа «Окта-платт» с полым шаром, к которому приваривают торцы круглых труб. Однако это соединение требует сборки конструкции на сплошных лесах, а главное, очень высокой точности изготовления и большого объема сварочных работ. Широко распространено узловое соединение стержней сетчатых куполов с использованием плоских или конических (тарельчатых) фасонки большого диаметра.

Может быть рекомендовано конструктивное решение узла на высокопрочных болтах сетчатых куполов пролетом 20–60 м с элементами стальных гнутосварных труб прямоугольного сечения или из гнутых П-образных профилей. Узловая деталь изготавливается из углеродистой стали и имеет вид звезды с шестью лучами. Каждый луч узловой детали имеет в основании утонченный участок – шейку, обеспечивающую возможность пластического отгиба в плоскости «звезды» (что важно при небольшой точности изготовления элементов оболочки). Стержни крепятся к лучам к узловой детали двумя высокопрочными болтами, причем для одного из болтов – внутреннего – сверление отверстий в узловой детали и стержне производится по номинальному диаметру, а для другого болта отверстия выполняются с большим диаметром. Люфт 2–3 мм обеспечивает возможность поворота стержня из плоскости «звезды» на требуемый угол. При монтаже до завершения сборки всего каркаса болты не затягивают, и только после того, как все элементы установлены и конструкция приняла заданную геометрическую форму, производится затяжка болтов на заданный крутящий момент.

#### **Изготовление и монтаж.**

Монтаж ребристых и ребристо-кольцевых куполов осуществляют, как правило, с использованием стационарных или передвижных опор в виде башен и мачт. В большинстве случаев используется только одна центральная временная опора, на которой размещается верхнее кольцо. Предварительно собранные на земле полуарки устанавливают попарно друг против друга, опирая на верхние и нижние кольца.

Способы монтажа сетчатых куполов более разнообразны. Они могут монтироваться на сплошных лесах поэлементно или блоками, а также с использованием отдельных временных опор, на которые опираются предварительно укрупненные части конструкции. Наиболее рациональной схемой монтажа большепролетных сетчатых куполов является навесная поярусная сборка от фундаментов к вершине без использования каких-либо вспомогательных опор. Возможен вариант монтажа подращенного от центра к контуру с постепенным подъемом на центральной мачте уже собранной части конструкции. Для подъема могут использоваться надувные баллоны.

#### **Методы расчета.**

Статический расчет металлических куполов всех типов на стадии рабочего проектирования выполняют в настоящее время, используя пространственные расчетные схемы с обязательной проверкой степени геометрической нелинейности несущей конструкции. Для этой цели используют универсальные программы, такие как «Ли́ра» и «Космос». Расчет выполняют для всех типа нагрузок – постоянной, снеговой, ветровой, сейсмической. Обязательным является расчет на температурные воздействия. При статическом расчете необходимо учитывать изменение расчетной схемы сооружения в процессе монтажа.

### **3.4. Пологие оболочки**

При квадратном плане пологую оболочку можно рассматривать как частный случай купола. Достаточно точное определение напряженного состояния пологой сетчатой оболочки связано со сложными и трудоемкими в математическом плане вычислениями. Для существенного упрощения процесса расчетов можно воспользоваться следующими основными допущениями:

1. Вертикальную равномерно распределенную нагрузку на покрытие принимаем нормальной к поверхности.
2. Оболочка имеет поверхность, являющуюся элементом сферы.
3. Контур оболочки обладает весьма малой деформативностью в своей плоскости, т. е. предполагается наличие жестких опорных диафрагм (контурных ферм).

### 3.5. Конические оболочки

Конические оболочки по конструктивному принципу аналогичны сетчатым куполам, но уступают последним по жесткости. Конические оболочки имеют развертывающуюся поверхность, что облегчает раскрой элементов кровельного покрытия. В мировой практике нет значительных примеров сетчатых конических оболочек. Для промышленного строительства такие оболочки наиболее интересны как покрытия складов сыпучих материалов, т. к. в данном случае форма покрытия хорошо соответствует конической форме насыпи. Возможен вариант использования конических оболочек для покрытий гражданских зданий.

Геометрическая структура сетчатых конических оболочек так же, как и куполов, может быть построена на основе форм правильных многогранников, при этом в вершине конуса могут сходиться три, четыре или пять равносторонних треугольников. Все стержни имеют при этом одинаковую длину, но углы в смежных горизонтальных поясах оболочки изменяются, как это следует из рассмотрения конических сечений.

Приблизительный расчет сетчатых конических оболочек производится аналогично расчету цилиндрических и сферических сетчатых оболочек, т. е. при расчете конус разделяется на условные плоские арки и производится определение усилий в элементах этих арок.

### 3.6. Складки

Складчатые конструкции состоят из плоских элементов – граней, соединенных между собой под углом так, что в месте их сопряжения образуются участки с повышенной жесткостью (ребра), через которые от одной грани к другой передаются сдвигающие усилия (а иногда и нормальные усилия и изгибающие моменты).

Независимо от очертания плана покрытия складки могут иметь консольные свесы, а также наклонное положение вдоль перекрываемого пролета. При прямоугольном плане низ покрытия по ряду колонн завершается диафрагмой (затяжкой, рамой и т. п.).

При приближенном расчете решетчатую складку можно рассматривать как конструкцию, состоящую из отдельных плоских ферм. В этом случае статический расчет складки сводится к опреде-

лению нагрузки, действующей на отдельные плоские грани, и к вычислению усилий в обычной ферме.

При расчленении складки на отдельные плоские грани вертикальная сосредоточенная нагрузка раскладывается на составляющие усилия, действующие в плоскостях граней. Профиль поперечного сечения складки может быть любым. Принцип разложения складки на отдельные плоские грани и распределение нагрузки между ними остаются без изменения.

Наклонные грани складки воспринимают узловые нагрузки, действующие в их плоскостях, поэтому при определении усилий их рассматривают как обычные фермы с нагрузкой, приложенной к верхнему и нижнему поясам. Усилия в стержнях фермы находят либо построением диаграммы Максвелла-Кремоны, либо другими методами строительной механики. В поясах складки усилия равны сумме усилий, определенных в двух смежных гранях. В складке с трапецевидным профилем поперечного сечения горизонтальные составляющие нагрузки воспринимаются горизонтально расположенной гранью. В крайних складках с любым профилем поперечного сечения для восприятия горизонтальных составляющих предусматривают бортовые элементы или промежуточные диафрагмы.

### 3.7. Гипары

Оболочки с поверхностью гиперболического параболоида сокращенно называют гипарами. Они имеют весьма широкие возможности по формообразованию покрытий из сеток с прямолинейными стержнями. Наиболее распространены сочетания нескольких гипаров. Например, такой тип покрытия использовался для надстройки универсама «Беларусь» в г. Минске.

По контуру оболочки опираются чаще всего на колонны, возможно опирание на фермы. По линиям сопряжения, так называемым коньковым линиям, располагаются коньковые элементы относительно небольшой жесткости. Эти элементы – упругие, податливые. Основные опоры размещаются в углах оболочки либо опираются у коньков, а углы могут иметь консольное решение.

Прямоугольные гипары позволяют создавать составные оболочки для покрытий многопролетных промышленных зданий.

Кроме оболочек с поверхностями из равносторонних гипаров применяют также поверхности с неравносторонними гиперболиче-

скими параболами, план которых может быть, в частности, в виде ромба или треугольника. Косоугольные гипары применяются для покрытий общественных зданий больших пролетов.

### **3.8. Плоские структурные плиты**

Плоские пространственные системы для обеспечения необходимой жесткости обычно проектируются двухслойными. Двухслойные конструкции имеют две параллельные сетчатые поверхности, соединенные между собой жесткими решетчатыми связями.

В современном строительстве получили распространение сетчатые системы регулярного строения для плоских покрытий, называемые структурными конструкциями или просто структурами.

Область применения перекрестно-стержневых конструкций (структур) весьма разнообразна. Прежде всего, это покрытия выставочных павильонов (например, выставочный зал бывшего ВДНХ РБ в г. Минске) и демонстрационных залов, театров, концертных и киноконцертных залов, торговых залов рынков и магазинов, легкоатлетических манежей, спортивных залов, катков, плавательных бассейнов, складов, гаражей производственных зданий.

Структурные конструкции позволяют перекрывать здания, имеющие в плане различные конфигурации.

Недостатки структурных конструкций:

1. В отдельных случаях возможна большая металлоемкость по сравнению с традиционными конструкциями, что является следствием унификации сечений стержней и относительно большого расхода металла, необходимого для обеспечения устойчивости стержней при небольших усилиях в них. В типовых структурных конструкциях обычно применяются круглые трубы, более удобные для работы на центральное сжатие, чем прокат, при одинаковых расчетных длинах. Однако круглые трубы на 40–50 % дороже обычного проката, поэтому стоимость структурных плит из круглых труб выше, чем стоимость конструкций современных прогрессивных ферм (например, типа «Молодечно»).

2. Сложность конструктивных решений узлов (при сопряжении шести и более стержней). Часть узлов требует очень высокой точности изготовления стержней и их сборки (она достигает точности, используемой в машиностроении). Все это повышает удельную трудоемкость изготовления.

3. В структурах мала степень заводской готовности. На строительной площадке для некоторых типов структур велика доля монтажной сварки.

Очевидно, что структуры не могут полностью заменить другие легкие металлические конструкции и имеют достаточно четкую область рационального применения.

#### **Типы структурных плит.**

Различные типы перекрестно-стержневых конструкций (структур) образуются при пересечении плоских ферм в двух, трех и даже четырех направлениях. При вертикальном расположении пересекающихся ферм плоскости верхних и нижних поясов плит разбивают на квадратные, треугольные и шестиугольные ячейки. Такие плиты по геометрическому строению можно рассматривать как конструкцию, состоящую из однотипных элементарных стержневых призм с квадратным, треугольным или шестиугольным (гексагональным) основанием.

Наклонные фермы при взаимном пересечении на плоскости верхних и нижних поясов плит образуют сетки с квадратной, треугольной или шестиугольной ячейками. В плане ячейки поясов оказываются смещенными одна относительно другой. Такие плиты представляют собой конструкции, образованные из многократно повторяющихся стержневых пирамид с квадратным (пентаэдры), треугольным (тетраэдры) или шестиугольным (гептаэдры) основанием. Обычно размер стержней для ячеек – 1–3 м.

Возможности создания различных конфигураций структур поистине неограниченны. Кроме того, часть стержней, сравнительно слабо нагруженных, может быть без ущерба для несущей способности плиты изъята, т. е. структура станет разряженной.

В последние годы разрабатываются такие решения структурных систем, в которых кровельные элементы – железобетонные, клеефанерные, трехслойные или другие плиты или стальной профилированный настил – включаются в работу, а в идеале заменяют стержни верхней поясной сетки. Таким образом, реализуется принцип совмещения функций несущих и ограждающих конструкций. В структурных плитах все стержни с точки зрения статической работы могут быть разделены на абсолютно необходимые и условно необходимые. Абсолютно необходимым называют стержень, выход которого из строя приводит к исчерпанию несущей способности всей плиты. Такими стержнями являются, например, опорные стержни, если их не более трех.

Условно необходимые стержни – это стержни, выход из строя которых не приводит к отказу всей системы (геометрическая неизменяемость сооружения в целом и устойчивость сжатых стержней сохраняются).

Типы ячеек стержневых плит позволяют компоновать покрытия любой формы: квадратной, прямоугольной, шестиугольной, криволинейного очертания. Для стержневых плит с квадратными ячейками наиболее рациональна квадратная форма плана. В этом случае конструкция работает равноценно в обоих направлениях (вдоль сторон квадрата). При переходе к прямоугольной форме плана изгибающие элементы в направлении короткой и длинной сторон прямоугольного плана становятся различными по значению. Уже при соотношении сторон прямоугольника 1:0,8 в плите с опиранием по контуру влияние изгибающих моментов в направлении меньшей стороны плиты увеличивается в 1,56 раза, а в плите с опиранием по углам на четыре колонны влияние изгибающих моментов в направлении большей стороны плиты возрастает в 2,25 раза. При дальнейшем увеличении отношения сторон прямоугольника применение плит с ортогональной поясной сеткой становится нецелесообразным, т. к. практически всю нагрузку будут воспринимать фермы одного направления.

Плиты с треугольными поясными ячейками имеют геометрически неизменяемую пространственную сетку и являются более жесткими. Они удобны для сложных планов и для плит с разнообразными консольными участками. Однако такие плиты более сложны в конструктивном отношении и более трудоемки при монтаже из-за большого числа элементов.

Стержневые плиты можно использовать не только в плоских покрытиях. Возможно их применение в односкатных, двухскатных, шедовых покрытиях.

При применении стержневых плит в покрытиях сложной формы создается несущая система, которая является одновременно основной объемно-планировочного решения и архитектурной выразительности здания.

#### **Опирание стержневых плит.**

Расположение опор для стержневых плит определяется архитектурно-планировочным решением помещений. Одно из существенных преимуществ плит – возможность размещения опор в любой зоне конструкции в соответствии с замыслом архитектора.

При опирании покрытия по контуру в опорных зонах стержневой плиты возникают значительные усилия, поэтому расход металла на такое покрытие существенно увеличивается. Если колонны предусмотреть внутри контура плиты, то консоли окажут разгружающее влияние на плиту. В случае размещения колонн по периметру покрытия и внутри контура, стержневая плита превращается в неразрезную конструкцию. Как и в многопролетных балках, опорные изгибающие моменты оказывают разгружающее влияние на участки плиты в пролете, приводя в итоге к экономии металла.

Для стержневых плит можно использовать различные комбинированные опоры. Такими опорами могут служить ванты, подстропильные фермы, арки. Рационально применение колонн с развитыми капителями или пространственных опор.

### **Конструкция стержней.**

Наиболее рациональным профилем для стержней плит является труба круглого сечения. При условии одинаковой гибкости сжатого стержня применение круглых труб позволяет экономить металл до 15–20 % по сравнению со стержнями из прокатных уголков. Вместо круглых труб можно успешно использовать холодногнутые сварные трубы квадратного сечения. Прокатные уголки применяют в монтажных блоках «ЦНИИСК», английской системе «Спейс-дек», французской системе «Пирамитек». Двутавровые профили используют во Франции для сеток с квадратными и шестиугольными ячейками. Гнутые швеллеры эффективно используют в американской системе «Юнистрат». Возможно применение сплошных стержней круглого сечения.

### **Узлы структурных конструкций.**

В мировой строительной практике в настоящее время насчитывается более 130 различных структурных систем, отличающихся, прежде всего, узлами сопряжения стержней. В СНГ распространенные получили лишь несколько систем, часть из которых изготавливается на специализированных заводах. В зависимости от способа соединения элементов они подразделены на три основные группы.

I группа – *болтовые соединения*. К ним относятся узловые соединения, исключаяющие сварку как в заводских, так и в монтажных условиях и позволяющие собирать структуры только на болтах или других сборочных деталях. В эту группу входят:

а) соединение уголкового стержней на болтах внахлест. Применяется в нижних узлах структурных конструкций систем, работающих преимущественно в одном направлении;

б) соединение типа «Юнистрат». Разработано в США фирмой «Юнистрат Корпорейшн». Узловая фасонка выполнена методом штамповки. В фасонке предусмотрены отверстия для соединения на болтах стержней из гнутых профилей;

в) соединение системы «Сокол». Состоит из шести тонкостенных пирамидальных деталей, изготовленных из стального листа с помощью штамповки. Эти детали между собой и с элементами решетки соединяются с помощью болтов. Для обеспечения необходимой жесткости детали узла имеют вокруг отверстий выштампованные выступы;

г) узловое соединение «Триодетик». Разработано канадской фирмой «Фэнтимэн». Узловой элемент представляет собой цилиндр, вдоль образующих которого имеются пазы с рифлеными стенками. Стержни, имеющие опрессованные по профилю пазов торцы, вставляются в цилиндр и фиксируются в прорезях узла двумя крышками, соединенными болтом. Сборка структурной конструкции с применением данных узлов существенно упрощается, т. к. в узле требуется постановка только одного болта. Подобный узел применяется в системе «Берлин» (Германия).

II группа – *комбинированные соединения*. К этой группе относятся соединения, в которых применяется заводская сварка, а сборка узла осуществляется на болтах. Характерным для этой группы является расчленение узлового соединения на две группы деталей: детали первой группы привариваются в заводских условиях к торцам соединяемых стержней (болтовые наконечники, листовые фасонки и т. д.), а детали второй группы (болты, сферы и т. п.) объединяют стержни в одном узле. В числе таких соединений следующие:

а) узловые соединения системы «Меро» и «Веймар», разработанные в Германии, «МАрХИ» и «Кисловодск», разработанные в России. В этих системах основными элементами являются сферические или полусферические детали с резьбовыми отверстиями, в которые ввинчиваются вращающиеся на концах стержней болты. В системах «Меро» и «Веймар» болты к стержням присоединяются с помощью конических наконечников, а в системах «МАрХИ», «Кисловодск» – с помощью плоских цилиндрических шайб, приваренных к торцам трубчатых стержней, а также поводковых втулок и штифтовых фиксаторов. В отличие от системы типа «Меро», в Японии большое распространение получили узловые соединения трубчатых стержней на

полых сферах (система NS), в которых соединительные болты через отверстие в сфере завинчиваются с внутренней стороны;

б) соединение на фланцах. Разработано в «ЦНИИПСК» для трубчатых стержней и «ЛенЗНИИЭП» для прокатных профилей применительно для структур, собираемых из готовых пирамид. Основания стержневых пирамид образуют сжатую поясную сетку, узловое соединение которой состоит из двух фланцев с приваренными стержнями поясов и раскосов. Фланцы на монтаже объединяются с помощью болтов;

в) соединение уголковых профилей на болтах при помощи листовых фасонки, приваренных в заводских условиях к длинноразмерным поясам. Соединение применяется в верхних узлах конструкций, работающих преимущественно в одном направлении;

г) соединение на болтах в узлах с пространственными фасонками, свариваемыми в заводских условиях из отдельных листов.

III группа – соединения, осуществляемые с применением *монтажной сварки*:

а) соединение системы «Октаплаттен» фирмы «Маннесман» (Германия). Стержни привариваются к фасонным деталям узлов в виде полых сфер (свариваемых из отдельных частей);

б) соединение трубчатых стержней со сплюснутыми торцами, объединяемых в узлы с помощью ванной сварки;

в) соединение стержней в узел с помощью автоматической электрошлаковой сварки;

г) узлы системы «Дю Шато» (Франция). Отличаются от узлов «Октаплаттен» тем, что здесь между сфер используются узловые штампованные фасонки криволинейного очертания (дискообразной формы). В каждой из двух фасонки (полудисков) предусмотрены шесть отверстий. Фасонки свариваются между собой по наружным линиям касания; стержни из круглых труб, входящие в отверстия фасонки, обвариваются на монтаже. Недостаток таких узлов – большой объем монтажной сварки.

#### **Структурные плиты типа «Кисловодск».**

В СНГ широко применяются трубчатые структуры из коротко-размерных элементов системы «Кисловодск» с узлами типа «МАрХИ», являющимися разновидностью узлов системы «Меро». Узел состоит из полусферического многогранного элемента – коннектора. В теле коннектора высверлены отверстия для болтов по числу при-

мыкающих стержней. Коннекторы изготавливаются методом точного литья с последующей фрезеровкой поверхностей. Возможен вариант изготовления коннектора из шестигранной заготовки.

Болт пропущен в отверстие плоской цилиндрической шайбы-заглушки, приваренной к торцу трубы. Между коннектором и шайбой размещается поводковая втулка со штифтовым фиксатором. Болт заворачивается в коннектор до обеспечения плотного касания между последним и втулкой. Таким образом, сжимающее усилие передается через площадки касания, а растягивающее усилие – через болт. Стержни обладают большой компенсационной способностью, узел легко собирается. Под компенсационной способностью стержней здесь понимается возможность сравнительно легкой сборки и крепления их в узлах, если даже в этих стержнях есть отклонения от проектных размеров по длине. Недостатком является значительная трудоемкость изготовления элементов узла. Хладостойкость узла несколько понижена из-за наличия весьма острых концентраторов напряжений (нарезка резьбы для болтов в теле коннектора) и возможной перегрузки болта от внецентренной передачи усилия, если заглушка приварена к стержню с перекосом.

Стержни структурных плит с узлами типа «МАрХИ» изготавливаются из круглых бесшовных труб по унифицированному сортаменту, разработанному Московским архитектурным университетом, что предоставляет проектировщику в широких пределах использовать структурные системы при различных конфигурациях плана и при разном характере опирания. Составные отправочные марки унифицированного сортамента включают трубчатые стержни длиной 1,5; 2 и 3 м с различным диаметром и толщиной стенки и узловыые элементы-коннекторы различных размеров, отличающиеся диаметром резьбовых отверстий и назначением.

Минимальный расход стали и наименьшие трудозатраты при изготовлении и монтаже возможно получить при длине стержней 3 м. Меньшая высота структурной плиты при длине стержней 2 м и тем более 1,5 м приводит к перерасходу стали и трудозатрат при изготовлении и монтаже, что не способствует снижению приведенных затрат. Вследствие этого рекомендуется уменьшенные длины применять только в особых случаях, оправданных архитектурными требованиями или производственной необходимостью.

С использованием унифицированного сортамента осуществляется серийное изготовление структурных плит типа «Кисловодск» высотой 2,12 м и размерами в плане 30×30 и 36×36 м. На заводах СНГ изготавливаются такие конструкции, позволяющие перекрывать ежегодно свыше 2 млн м<sup>2</sup> производственных площадей. Опираение плит предусмотрено внутриконтурное – на четыре колонны, расположенные для секций 30×30 м с шагом 18×18 м, для секций 36×36 м с шагом 24×24 м. Поставка осуществляется комплексно на одну секцию, т. е. вместе со структурной плитой поставляются профилированный настил, колонны, фахверк, стеновое ограждение, а иногда специальное оборудование (подвесные краны грузоподъемностью до 2 т и т. п.). Высота до низа стропильных конструкций может колебаться в пределах 4,8–8,4 м. В покрытии можно устраивать зенитные фонари. Шаг стоек фахверка 6 м. Стержневая пространственно-решетчатая конструкция имеет ортогональную сетку верхнего и нижнего поясов с ячейкой 3×3 м. Узлы верхнего и нижнего пояса соединены раскосами. Все стержни одной стержневой системы имеют одинаковую номинальную длину. Для крепления стального профилированного настила по верхним узлам структурной плиты предусмотрена установка прогонов из швеллеров. Свое название система получила по названию города (Кисловодск), где впервые был построен объект с ее применением.

Конструкции типа «Кисловодск» рекомендуется применять в первую очередь в зданиях павильонного типа, однопролетных зданиях на одну секцию (30×30 или 36×36 м) без светоаэрационных фонарей, бескрановых или с подвесными кран-балками грузоподъемностью до 2 т в пролетах 18 м; с неагрессивной и слабоагрессивной степенью воздействия газовой среды; с расчетной сейсмичностью до 9 баллов, возводимых в I–IV ветровых и снеговых районах с расчетной температурой наружного воздуха –40 С° и выше для отапливаемых зданий и –30 С° и выше для неотапливаемых зданий.

При использовании типовых структурных плит в многопролетных зданиях не допускаются перепады высот кровли.

За последние годы осуществлена модернизация системы «Кисловодск»–«МАрХИ». Произведено разряжение решетки и частично поясов в средней части плиты, где усилия в стержнях невелики.

### **Структурные системы «ЦНИИСК», «Москва».**

Кроме конструкций плит из короткоразмерных трубчатых элементов в СНГ широко осуществляется строительство промышлен-

ных зданий с сеткой колонн 12×18 и 12×24 м со структурными покрытиями, пояса которых изготовлены из длинноразмерных прокатных элементов (система «ЦНИИСК» (табл. 3.1.) серии 1.460-4). Структурная плита опирается по углам в уровне верхних поясов и имеет высоту 1,5 м. Высота здания может быть 5,2–11,2 м. Такие покрытия можно устраивать в бескрановых зданиях и в зданиях с мостовыми кранами грузоподъемностью 10 и 20 т, а также в зданиях с подвесными двухопорными кранами (пролет крана 15 м) грузоподъемностью 2 (3,2) т. Предельные размеры температурных отсеков здания составляют 72×72 м.

Таблица 3.1

Номенклатура структурных блоков типа «ЦНИИСК»

Марка блока	Пролет, м	Расчетная допускаемая нагрузка, кН/м <sup>2</sup>	Расход стали	
			Общий	На 1 м <sup>2</sup>
C10-18×12	18	2,4	4 631	21,4
C5-18×12		3,8	5 487	25,4
C9-18×12		4,65	6 219	28,8
C2-24×12	24	2,2	6 210	21,6
C5-24×12		3,3	7 985	27,7
C9-24×12		4,45	9 260	32,2

Конструкция блока покрытия (размерами 12×18 м или 12×24 м) представляет собой пространственно-стержневую систему с ортогональной сеткой поясов. Предельные пояса верхней поясной сетки выполняются длиной в половину пролета (9 или 12 м) из прокатных двутавров и швеллеров, а поперечные – короткоразмерными длиной в одну панель (2,91 м) из уголков. Все стержни нижней поясной сетки выполняют длинноразмерными (длиной в несколько панелей).

Нижние и верхние продольные пояса крепят к торцовым сварным фермам, пролет которых 12 м. Раскосы (из одиночных и парных уголков) закрепляются на болтах нормальной точности в верхних узлах конструкции к фасонкам, приваренным к продольным поясам, а в нижних – непосредственно к полкам продольных поясных уголков. Поперечные пояса с продольными также соединяются болтами

нормальной точности диаметром 20 мм. Отверстия под болты – диаметром 21,5 мм. Между гайкой и соединяемыми элементами прокладывается пружинная шайба. При наличии подвешеного транспорта необходима постановка дополнительных контргаек или после затягивания основных гаек производится забивка резьбы в болтах.

Конструкция является беспрогонной. Стальной профилированный настил укладывается непосредственно на верхние продольные пояса. Конструктивные элементы блока с завода на стройплощадку доставляются комплектно в специальном пакете. Конструкции собирают обычно на земле, а в проектное положение устанавливаются вместе с утеплителем и гидроизоляционным ковром.

Модернизированная конструкция «ЦНИИСК» из прокатных профилей, названная системой «Москва», имеет высоту блока 2,0 м и расстояние между верхними поясами 4 м. Аналогично системе «ЦНИИСК» верхние пояса изготавливаются из прокатных двутавров, а нижние пояса и решетка – из прокатных одиночных уголков. Конструкция разработана в двух вариантах. Первый вариант, предназначенный для отдаленных районов, предполагает поставку на строительную площадку плоских ферм пролетом 12 м с расположением их по торцам блока, длинноразмерных верхних и нижних поясов и раскосов россыпью. Соединение элементов – на болтах нормальной точности М20.

Второй вариант предполагает повышенную заводскую готовность. Блок собирается из плоских сварных ферм – четырех продольных и двух поперечных (у торцов блока). Поперечная жесткость в средней части блока обеспечивается четырьмя плоскими треугольными фермочками.

Блок «Москва» по второму варианту по сравнению с аналогичными блоками типа «ЦНИИСК» имеет примерно в 4,5–5 раз меньше отправочных марок и крепежных болтов. Системы «Москва» рассчитаны на следующие диапазоны расчетных вертикальных нагрузок: при пролетах 18 м – 2,94–6,18 кПа, при пролетах 24 м – 6,1–8,53 кПа.

#### **Структуры типа «Берлин».**

Структурные блоки типа «Берлин» аналогичны по схеме блокам «Москва». Блоки по углам своими верхними узлами опираются на четыре шарнирно-неподвижные опоры. Основными элементами пространственной конструкции являются двух- и трехметровые

элементы из бесшовных горячекатанных труб, соединенных специальными узловыми деталями. Блоки могут быть размерами  $12 \times 18$  м или  $12 \times 24$  м, высотой 1,8 м.

Система покрытия предусматривает обязательную сборку всех элементов в пространственный блок на земле до установки его в проектное положение. Идея этой конструкции была заимствована из практики строительства в Германии, где она известна под названием структурной конструкции типа «Берлин». Это название сохранилось и в СНГ.

Торцы трубчатых элементов сплющены и обрезаны под требуемым углом. К торцам приварены клиновидные калиброванные сегменты – наконечники. В процессе сборки покрытия наконечники соответствующих стержней, которые сходятся в узле, соединяются друг с другом с помощью стальных кованых чашкообразных накладок-крышек (чашек), положение которых фиксируется шпилькой диаметром 20 мм, проходящей через центры накладок-крышек. Шпильки затягиваются динамометрическим ключом на усилие 80 кН и закрепляются контргайками. В одном узле может соединяться не более восьми элементов структуры. Растягивающие усилия в узлах передаются через наконечники и крышки, сжимающие – через наконечники, которые плотно прилегают к шпильке.

Для опирания на структуру профилированного настила к ее верхним узлам с шагом 3 м закрепляются прогоны из швеллеров.

Блоки размером  $12 \times 18$  м запроектированы под нагрузку 2,2 и 2,8 кН/м<sup>2</sup>, блок  $12 \times 24$  м – под нагрузку 2,2 кН/м<sup>2</sup>. Принятый в расчете собственный вес элементов блока составляет при этом 0,20 кН/м<sup>2</sup>. Таким образом, полезная нагрузка на блоки составляет 2,0 и 2,6 кН/м<sup>2</sup>.

В блоках типа «Берлин» допускается подвеска сосредоточенного груза весом 10 кН к любому узлу нижнего пояса.

Для зданий с покрытием из блоков типа «Берлин» разработано несколько типов колонн: для бескрановых зданий и для зданий с мостовыми кранами. Сечение колонн – сварной или прокатный двутавр.

**Структурная система Уральского политехнического университета.**

Значительное распространение в строительстве получили структурные плиты, собираемые из объемных стержневых пирамид. Они

применяются в зданиях различной конфигурации в плане с регулярной и нерегулярной сетками колонн. К достоинствам таких конструкций следует отнести большую заводскую готовность и соответственно снижение количества монтажных соединений. При сборке пирамиды обычно располагают основаниями вверх, которые после соединения в углах образуют верхние поясные сетки. Нижние поясные сетки образуются линейными доборными элементами, соединяющими вершины пирамид. Набор пирамид с трехгранным основанием образует поясные сетки, идущие в трех направлениях, при этом нижние и верхние пояса параллельны. Набор четырехгранных пирамид образует ортогональную сетку поясов, в этом случае нижние пояса могут быть параллельны верхним поясам или расположены к ним под углом  $45^\circ$ . Система, образованная из пирамид, имеет часто разреженную решетку и в ряде случаев разреженную сетку поясов, от чего количество элементов значительно сокращается. В практике строительства сечения элементов пирамид применяют из прокатных и гнутых профилей. Рекомендуется основание пирамид выполнять из уголков или швеллеров.

Наиболее целесообразно подобные конструкции применять на планах, близких к квадрату, при частом расположении колонн по периметру здания. В этом случае количество типов пирамид, отличающихся друг от друга составными элементами, минимально.

При опирании на редко расположенные колонны приопорные пирамиды существенно отличаются от остальной массы пирамид ввиду больших поперечных усилий, возникающих в приопорных стержнях, что приводит к необходимости увеличения количества отправочных марок. Примером структуры из пирамид с длинно-размерными доборными элементами является конструкция, разработанная в Уральском политехническом университете.

В такой плите четырехгранные пирамиды, изготовленные из односторонних уголков, стыкуются основаниями в углах. Из оснований пирамид образуется верхняя поясная сетка. Углы пирамид соединяются с помощью фланцев, причем фланцы представляют собой гнутые фасонки с приваренными ребрами для крепления граней пирамиды. Вершина пирамиды – это фасонка с четырьмя отогнутыми краями, к которым привариваются уголки боковых граней. В фасонке предусмотрены отверстия для высокопрочных болтов. Нижние пояса, развернутые на  $45^\circ$  по отношению к верхним, выполняются из двух

уголков; один из поясов (нижний) может выполняться из швеллера. Главные достоинства подобных структур: простота конструкции узла, применение обычного проката, возможность изготовления элементов на универсальных заводах металлоконструкций.

### **Особенности расчета структурных плит.**

Структурная конструкция представляет собой многократно статически неопределимую систему. Точный расчет структурной конструкции сложен и выполняется с помощью ЭВМ. При упрощенном подходе конструкция рассматривается как ортотропная пластинка с упругими характеристиками и граничными условиями, соответствующими стержневой конструкции.

## **3.9. Складчатые листовые конструкции**

Складка представляет собой пространственную конструкцию, у которой плоские грани соединяются между собой под углом и изготавливаются из тонкого (1–2 мм) стального или алюминиевого листа. Простейшей складкой является профилированный настил. Но, так как высота настила невелика (нашей промышленностью стальной профнастил выпускается с максимальной высотой гофров 114 мм), то им можно перекрывать пролеты до 4 м (максимально до 6 м) и, как правило, при работе настила по неразрезной схеме.

В складках из тонкого листа реализуется принцип совмещения функций несущих и ограждающих конструкций. Благодаря пространственной работе, высокой степени тонкостенности складки являются весьма эффективными системами, пригодными для зданий комплектной поставки.

Широкое распространение в СНГ получили полигональные покрытия из лоткообразных элементов с пролетами 12, 18, 24 м и более. Эти системы разработаны в УкрНИИпроектстальконструкции. Здания такого типа можно видеть на промышленных предприятиях, в аэропортах и т. п. Они могут быть использованы в качестве мастерских, складов, гаражей, укрытий для техники, компрессорных и других станций, зерно- и овощехранилищ и т. п.

Такие здания можно оборудовать тельферами и легкими кран-балками. При перевозке лоткообразные элементы укладываются «один в один» (таким образом, они весьма удобны для транспортировки).

Тонкостенные лотковые элементы имеют по кромке специальные отгибы-отбортовки, обеспечивающие возможность соединения смежных лотков по продольным граням. К торцам лотков привариваются фланцы, позволяющие соединять лотки под заданным углом в единую арочную систему. Лотки выполняются из алюминиевого сплава АМг21/2Н или малоуглеродистой стали марки С235. Бортовые элементы соединяются друг с другом с помощью оцинкованных либо кадмированных болтов, или контактной точечной сварки. Утеплитель для отапливаемых помещений можно клеить к внутренней поверхности лотков, подвешивать к складкам в виде щитов и др. Возможно создание трехслойных складок, состоящих из двух обшивок, зазор между которыми заполняется эффективным утеплителем.

Узлы опирания лотков на фундамент обеспечивают достаточно жесткое сопряжение (на фланцах). Распор передается через анкерные болты на фундамент.

Обладая сравнительно небольшими размерами и малым весом (стальные 70–100 кг, алюминиевые 30–40 кг), лоткообразные элементы легко монтируются. Для их монтажа используются краны малой грузоподъемности. Их можно изготавливать на поточных механизированных линиях. Основные операции – прямолинейные резы заготовок, холодная гибка лотка и отбортовок, сверление отверстий в отбортовках и фланцевых деталях, приварка фланцев.

В США и Канаде ежегодно возводится до 10 тыс. зданий в виде цилиндрических сводов-оболочек из холоднодеформированных стальных профилей.

Большую часть этих сводов пролетом 7,6–30,5 м используют для неотапливаемых складов, зернохранилищ и помещений для сельскохозяйственного инвентаря. Расход стали на 1 м<sup>2</sup> однослойного свода 16–22 кг.

Гнутые профили для этих оболочек могут быть изготовлены шириной 300 или 600 мм, высотой до 200 мм из листовой малоуглеродистой стали толщиной 0,75–1,0 мм. Они имеют криволинейную, трапециевидную или прямоугольную форму поперечного сечения. Профили соединяются между собой по продольным краям на болтах или с помощью фальца, образованного специальной кромкогибочной машиной. Поперечные стыки профилей выполняются на болтах, винтах или заклепках.

На вертикальных и горизонтальных стенках профиля предусмотрено поперечное рифление, благодаря которому его поверхность имеет волнистую (гофрированную) форму в продольном направлении, что обеспечивает местную устойчивость стенок, повышает жесткость оболочки и позволяет уменьшить ее толщину.

Конструкция и технология изготовления таких арочных покрытий разработана фирмой «Knudsen Ltd» (США). Гнутые элементы корытообразного сечения выполняют на строительной площадке с помощью передвижного профилегибочного агрегата, установленного на базе грузового автомобиля с прицепом. (Несколько таких машин используется в России при возведении картофеле-, овощехранилищ, складов и др.).

Агрегат включает в себя разматыватель рулона стали, несколько профилирующих установок (клетей) и гидравлические ножницы для непрерывной резки готового профиля на отрезки требуемой длины. Производительность гибочного стана – до 18 м готового профиля в минуту. Полученные на стане прямолинейные профили затем изгибают по дуге окружности с помощью инвентарной установки, смонтированной на строительной площадке.

Монтаж покрытия осуществляется одним автокраном и бригадой из 10–12 человек.

В утепленных покрытиях зданий арочные элементы располагают в два слоя. На элементы внутреннего слоя до монтажа наносят слой пенополиуретана.

Аналогичные сборные металлические оболочки системы «СМО Omega», разработанные фирмой «Ergobat» (Франция), монтируются из стальных оцинкованных или лакированных профилированных элементов волнообразного сечения шириной 800 мм. Эти элементы производят прямолинейными длиной 20–29 м (для плоских покрытий пролетами 14–20 м с консольными свесами) или криволинейными с радиусом кривизны 35–65 м.

В Уральском политехническом университете разработана конструкция *инвентарных зданий с арочным (полигональным) покрытием* пролетами 12 и 18 м. Здание komponуют из нескольких типовых секций шириной 3 м. Секцию собирают из четырех или шести одинаковых плоских панелей. Каждая панель имеет два продольных ребра из стальных гнутых С-образных профилей, соединенных тремя поперечными ребрами из таких же профилей, но меньшей высоты. К по-

перечным ребрам с обеих сторон крепят стальной оцинкованный профилированный настил марки С44-1000-0.8. Пространство между листами настила заполняется утеплителем из минераловатных плит или пенополиуретана. Возможен вариант неотопливаемых зданий такого типа (с однослойным покрытием из стального профнастила).

Расход стали на 1 м<sup>2</sup> здания пролетом 18 м составляет 64 кг. Преимущество таких зданий – очень малые сроки возведения, простота конструкции.

Точный расчет складок весьма сложен, так как они являются многократно статически неопределимыми системами. Обеспечение устойчивости является первостепенной проблемой для таких тонкостенных конструкций, поэтому исключительно важен правильный выбор геометрической формы конструкции. Формы складчатых покрытий из стального листа могут быть подобны и тем, которые принимаются для сетчатых (решетчатых) складчатых покрытий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебно-методическом пособии приведены сведения о легких металлических конструкциях, которые обеспечивают существенное снижение металлоемкости изделий, приспособленность их для высокомеханизированного поточного изготовления, комплектной поставки и блочных методов монтажа.

Существенной экономии металла и расширения целесообразной области применения легких металлических конструкций можно достичь при внедрении в строительство сталей и сплавов с высокими прочностными характеристиками, новых эффективных горячекатаных и холодноформованных профилей и настилов. Для нужд строительства необходимо шире использовать широкополочные двутавры, а также швеллеры и двутавры с тонкими стенками, открытые и замкнутые гнутосварные профили, обладающие рациональным распределением материала по сечению. Благодаря применению легких ограждающих конструкций снижается расход стали на несущие конструкции и одновременно создаются условия для организации конвейерного способа сборки и монтажа крупными блоками покрытий и стен зданий.

Использование прогрессивных технологий изготовления, благодаря чему производительность труда повышается в 1,5–2 раза, комплектность поставки элементов зданий (включая комплектно-блочные встроенные помещения административного, бытового и инженерного назначения), скоростной монтаж существенно повышают индустриальность строительства, приближают строительную отрасль по уровню технологического развития к машиностроению.

Результатом перехода на массовое изготовление ЛМК на автоматизированных линиях, создаваемых для специализированных предприятий, будет значительный рост производительности труда при улучшении качества конструкций и повышении общей культуры производства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Айрумян, Э. Л. Легкие стальные конструкции зданий с применением гнутых профилей / Э. Л. Айрумян, А. В. Рожков. – М. : ВНИИИС Госстроя СССР, 1987. – 77 с.
2. Бирюлев, В. В. Проектирование металлических конструкций / В. В. Бирюлев. – Л. : Стройиздат, 1990. – 431 с.
3. Брудка, Я. Стальные складчатые конструкции в строительстве / Я. Брудка; пер. с польского. – Киев : Будівельник, 1989. – 151 с.
4. Временные указания по проектированию зданий из легких металлических конструкций: СН 454-76. – М. : Стройиздат, 1976. – 46 с.
5. Мурашко, Н. Н. Металлические конструкции производственных сельскохозяйственных зданий / Н. Н. Мурашко, Ю. В. Соболев. – Минск : Высш. школа, 1987. – 279 с.
6. Кутухтин, Е. Г. Перспективы развития легких металлических конструкций комплектной поставки / Е. Г. Кутухтин, А. Ф. Гольденгерш // Промышленное строительство. – 1987. – № 7. – С 4–8.
7. Ищенко, И. И. Легкие металлические конструкции одноэтажных производственных зданий: справочник проектировщика. / И. И. Ищенко, Е. Г. Кутухтин; под ред. И. И. Ищенко. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Стройиздат, 1987.
8. Беленя, Е. И. Металлические конструкции. Общий курс. Учебник для ВУЗов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин; под общ. ред. Е. И. Беленя. – 6-е изд., доп. и перераб. – М. : Стройиздат, 1985. – 560 с.
9. Мельников, Н. П. Металлические конструкции: справочник проектировщика / Н. П. Мельников. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Стройиздат, 1980. – 776 с.
10. Рекомендации по учету жесткости диафрагм из стального профилированного настила в покрытиях одноэтажных производственных зданий при горизонтальных нагрузках. – М. : ЦНИИпроектстальконструкция, 1980. – 24 с.
11. Рекомендации по применению стальных профилированных настилов нового сортамента в утепленных покрытиях производственных зданий. – М. : ЦНИИпроектстальконструкция, 1987. – 25 с.
12. Сахновский, М. М. Легкие конструкции стальных каркасов зданий и сооружений / М. М. Сахновский. – Киев : Будівельник, 1984. – 160 с.

13. Стальные конструкции. СНиП II-23-81. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 94 с.

14. Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.

15. Тамплон, Ф. Ф. Ограждающие конструкции из алюминиевых панелей / Ф. Ф. Тамплон. – Л. : Стройиздат, 1976. – 96 с.

16. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции: учеб. пособие для ВУЗов / А. Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 215 с.

17. Хромец, Ю. Н. Современные конструкции промышленных зданий / Ю. Н. Хромец. – М. : Стройиздат, 1982. – 351 с.

18. Дыховичный, Ю. А. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): справочник / Ю. А. Дыховичный, Э. З. Жуковский. – М. : Высш. школа, 1991. – 544 с.

19. Шевченко, С. В. Пространственная работа каркасов зданий из легких металлических конструкций: автореф. дис. / С. В. Шевченко. – Минск : БГПА, 1994. – 26 с.

20. Горев, В. В. Металлические конструкции: в 3 т: учебн. для стр. ВУЗов / под ред. В. В. Горева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2001. – 3 Т.

21. Давыдов, Е. Ю. Электронное учебно-методическое пособие «Строительные конструкции». Раздел «Металлические конструкции». Для студентов специальности 1-70 03 02 «Промышленное и гражданское строительство», [Электронный ресурс] / Е. Ю. Давыдов. – Минск : БНТУ, 2020.

22. Шевченко, С. В. Здания из легких металлических конструкций / С. В. Шевченко. – Минск : БГПА, 1999. – 158 с.

Учебное издание

# **МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ В ТРАНСПОРТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Пособие  
для студентов специальности 7-07-0732-03  
«Строительство транспортных коммуникаций»

С о с т а в и т е л ь :  
**ШЕВЧЕНКО** Сергей Васильевич

Редактор *Р. А. Ягелло*  
Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать хх.хх.2024. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,38. Тираж 100. Заказ 279.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.