

УДК 624.014

АНАЛИЗ ОШИБОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПРИВОДЯЩИХ К АВАРИЯМ ИЛИ АВАРИЙНОМУ СОСТОЯНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*Директор института д.т.н., проф., Ведяков И.И.,
в.н.с., к.т.н. Гукова М.И., в.н.с., к.т.н. Фарфель М.И.,
с.н.с., Кондрашов Д.В., м.н.с., Иващенко С.В.
ОАО «НИЦ «Строительство» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко*

Каждый раз, как только возникают признаки аварийного состояния конструкций производственных зданий, службы эксплуатации зданий предполагают, что причиной является неверно принятая расчетная нагрузка, и просят специалистов произвести более тщательный расчет отдельных элементов, выходящих из строя, или целиком здания. Однако отказы работы отдельных элементов и целых зданий и сооружений происходят от совокупности причин, обусловленных допущенными ошибками как при проектировании, так и при изготовлении и монтаже конструкций.

1. Автотранспортный цех Таганрогского металлургического завода

В 1995 году сотрудниками ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко было проведено обследование технического состояния металлических конструкций покрытия автотранспортного цеха Таганрогского металлургического завода. Этот цех был построен в 1992 г. Цех имеет два пролета, покрытие которых образовано семью состыкованными секциями, включающими в себя пространственные решетчатые плиты из труб типа «Кисловодск». Каждая плита опирается без капителей на четыре колонны из труб, сетка колонн – 18х18м, размер плит в плане – 27х27м, размер секций – 30х30м (рис. 1.1). В узлах верхнего пояса структурных плит установлены разновысокие стойки из уголков, к которым прикреплены прогоны. По прогонам уложен стальной оцинкованный профилированный настил и кровля. Подвесной транспорт в здании отсутствует. Степень агрессивного воздействия среды в здании оценивается как слабоагрессивная.

В результате освидетельствования конструкций было выявлено:

- Отдельные элементы верхних поясов (24 шт.) и раскосов (20 шт.) структурных плит имели уменьшенное сечение, по сравнению с паспортом (вместо труб 127х5,5 установлены трубы 114х4,5); в одном раскосе вместо трубы 76х3 установлена труба 60х3; в двух раскосах вместо трубы 102х4 установлены трубы 76х3 и 60х3.

- Один раскос из трубы 60х3 вообще не установлен.

- В ряде элементов (29 шт.) обнаружены местные вмятины на стенках труб и общие искривления стержней (от 10 до 95мм) в результате внешних воздействий (в основном от ударов).

- Вместо кровельного профиля типа Н 57-750-0,8 весом 9,8 кг/м² уложены два стеновых профиля С 44-1000-0,8, каждый весом 8,5 кг/м²,

собранные в пакет с помощью комбинированных заклепок, установленных с шагом до 1200-1300мм вместо 600мм (и местами в один ряд вместо двух рядов).

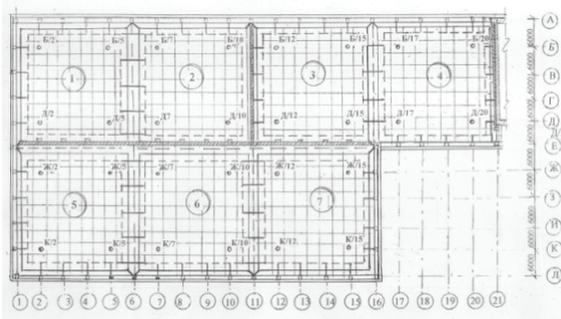


Рис. 1.1. Схема расположения структурных плит покрытия автотранспортного цеха завода «Тазмет»

- Профнастил только у краев листов закреплен самонарезающими винтами диаметром 6мм через 1-2 волны (по проекту профнастил закрепляется по краям листов в каждой волне и через одну волну – на промежуточных прогонах).

- Верхний лист профнастила уложен узкими полками вверх, что увеличило количество утеплителя (керамзита) на покрытии.

- Кровля цеха была выполнена с отступлением от проекта в сторону утяжеления. При проведении обследования выполнено вскрытие кровли в 8 местах (рис.1.2) на участках размером 0,5x0,5м² и произведено взвешивание всех слоев без разделения (рис. 1.3).

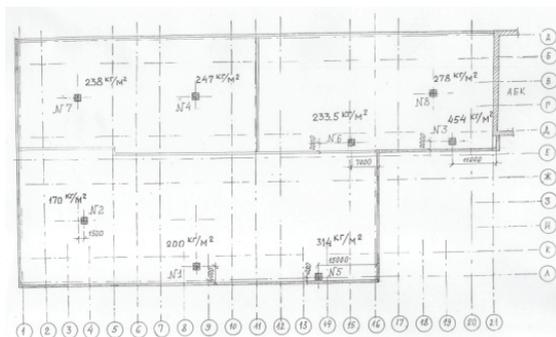
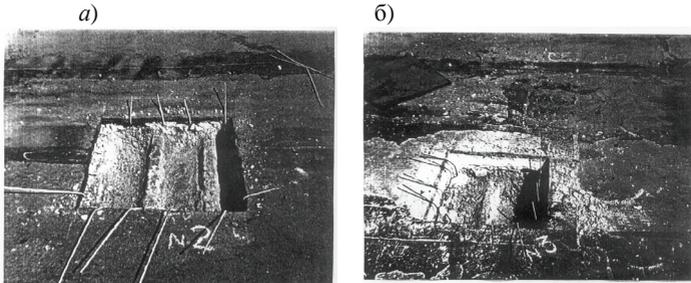


Рис. 1.2. Схема расположения мест вскрытия кровли и расчетная нагрузка от кровли на структурные плиты покрытия АТЦ

- В результате определения состава и веса кровли получено, что расчетная нагрузка (по паспорту <math> < 238,6 \text{ кг/м}^2 </math>) для структурной плиты №2 превысила паспортную на 3,5%, для плиты №4 – на 16.5% в центре и на 90% со стороны стены по ряду Д-Е.



*Рис. 1.3. Общий вид мест вскрытия кровли АТЦ:
а) №2 на секции 5 ($q_p = 170 \text{ кг/м}^2$);
б) №3 на секции 4 ($q_p = 457 \text{ кг/м}^2$)*

- Прогоны из гнутых швеллеров сечением 120x60x5мм, прикрепленные к стойкам болтами М16 не имели пружинных шайб под гайками болтов. Обнаружены болты с ослабленной затяжкой.

Таким образом, в результате перегрузки листы профнастила на участке покрытия по ряду Д-Е, оси 15-21 (секция №4) имели прогибы в середине пролета до 50мм с потерей устойчивости стенок гофров и полок профилей в пролете и на опорах (прогонах).

В результате непроектного закрепления профнастила и перегрузки кровлей прогоны имели прогибы от 10 до 50мм (при предельном прогибе 20мм – 1/150 пролета). Зоны наибольших прогибов прогонов (с закручиванием) располагались в секции №4 (ряд Д-Е, оси 16-21) и в секции №7 (ряд К-Л, оси 11-16). В двух местах на плите №7 в этой зоне прогнувшиеся прогоны касались верхних поясов плит. На плите №4 в этой зоне обнаружены искривленные стойки под прогоны. В узлах крепления прогона по ряду Д, ось 9 с каждой стороны обнаружены трещины в стенке швеллера.

После проведенного расчета структурной плиты с использованием вычислительного комплекса «Лира» было выявлено, что уменьшение сечений элементов и увеличение нагрузки от кровли, приводит к перенапряжению некоторых элементов верхних поясов плит до 16%, опорных раскосов до 46%, раскоса в секции №2 – на 45%, а в секции №5 – на 132%. Перегрузка прогонов по расчету в центре секции №4 составила более 14%, по ряду Д-Е – более 68% и в секции №7 по ряду Л – более 25%.

Оценка результатов освидетельствования, анализ технической документации и выполненных проверочных расчетов позволили сделать вывод, что техническое состояние металлоконструкций покрытия автотранспортного цеха следует считать недопустимым (предаварийным).

Были предложены технические решения по усилению элементов структурных плит и прогонов. Потребовалась замена профнастила, деформированных уголков и прогонов на некоторых участках покрытия. В течение нескольких лет проводилась регулярная очистка снега на кровле.

Позднее покрытие автотранспортного цеха было усилено путем подвески структурных плит к фермам, установленным на удлиненных верхних стойках.

2. Цех новых технологий в г. Можайске Московской области

За 2004-2006 годы произошло 10 обрушений конструкций покрытий производственных зданий. В восьми случаях причиной аварий было горизонтальное смещение опорного ребра стропильной фермы с опорного столика при нагрузке, близкой или превышающей проектную расчетную (при наличии на кровле снега).

Специалисты ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко непосредственно принимали участие в расследовании причин аварии, произошедшей 22 декабря 2005 года в цеху новых технологий №1 завода по производству изделий из ячеистого бетона в г. Можайске Московской области.

Обрушилось покрытие цеха, смонтированного в 2005 году, площадью 1440м². Погиб человек. Произошло прогрессирующее разрушение, начавшееся с выхода из строя узла опирания стропильной фермы на подстропильную.

Конструктивно цех №1 – однопролетное (пролет 24м) промышленное здание длиной 60м (рис.2.1).

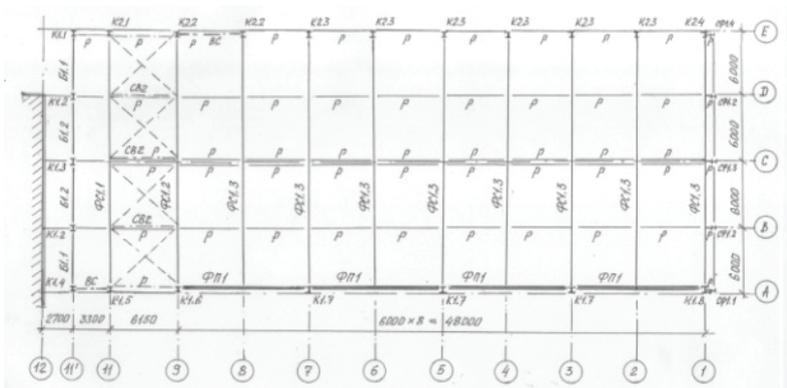


Рис. 2.1. Схема расположения элементов каркаса здания цеха №1

Каркас здания состоит из металлических колонн сечением из колонного широкополочного двутавра I 40К1 по внутреннему ряду (шаг 6м) и из широкополочного двутавра I 40Ш1 – по наружному ряду с подстропильными фермами (шаг 12м); стропильных ферм – из прямоугольных гнутосварных профилей типа «Молодечно» пролетом 24м с восходящим опорным раскосом и треугольной решеткой. Стыки поясов стропильных ферм оформлены с применением высокопрочных болтов: верхних – на фланцах, нижних – на накладках.

Примыкание стропильных ферм к колоннам и подстропильным фермам – шарнирное с опиранием на опорный столик, который приварен к полке колонны или к стойке подстропильной фермы. В прорезанные нижний пояс и восходящий раскос вварена вертикальная фасонка, с приваренным к ней опорным листом. Положение опорного листа стропильной фермы на колонне фиксируется на четырех крепёжных болтах М20 класса 5.8, которые не предназначены для работы в узлах опирания ферм, они имеют низкую прочность и низкую пластичность.

На верхние пояса ферм уложены прогоны из широкополочных двутавров I 35Б1 с шагом 3м и 6м, на которые самонарезающими винтами крепится профилированный металлический настил, выполняющий функцию остающейся опалубки для сплошной железобетонной плиты покрытия. По проекту кровля цеха, укладываемая на железобетонную плиту, должна состоять из пароизоляции, утеплителя, цементно-песчаной стяжки и трехслойного водоизоляционного ковра на битумной мастике.

В результате аварии обрушилось покрытие цеха: стропильные фермы, связи по покрытию, прогоны, балки и кровля. Колонны по наружному ряду в средней части длины цеха потеряли общую устойчивость (рис.2.2). Подстропильные фермы в некоторых местах по верхним поясам оторвались от колонн. Ригели фахверка между колоннами ниже подстропильных ферм полностью оторвались. Все десять стропильных ферм обрушились полностью. Все болты в узлах опирания верхних и нижних поясов стропильных ферм на колонны и подстропильные фермы разрушились.

В ряде узлов стропильных ферм разрушились накладки в стыке нижнего пояса, разрушились сварные швы крепления к фланцу гнутосварного профиля в монтажном стыке верхнего пояса и сварные швы крепления раскосов к поясам ферм.

При обрушении покрытия технологическая нагрузка 60 кг/м^2 отсутствовала. Проектная расчетная нагрузка (без технологической) составляла 705 кг/м^2 .

Расчетная нагрузка от снега толщиной 32см определена в лаборатории теории сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.

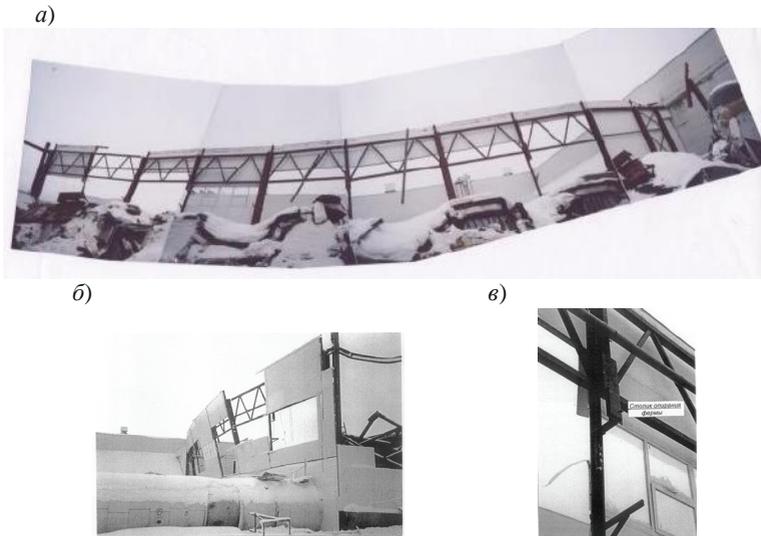


Рис. 2.2. Общий вид каркаса цеха по ряду А после обрушения:
 а) вид изнутри цеха; б) вид снаружи; в) узел опирания стропильной
 фермы на подстропильную. Болты в узлах полностью разрушены

Для определения фактических нагрузок на покрытие Комиссией были произведены замеры в восьми точках покрытия (рис. 2.3).

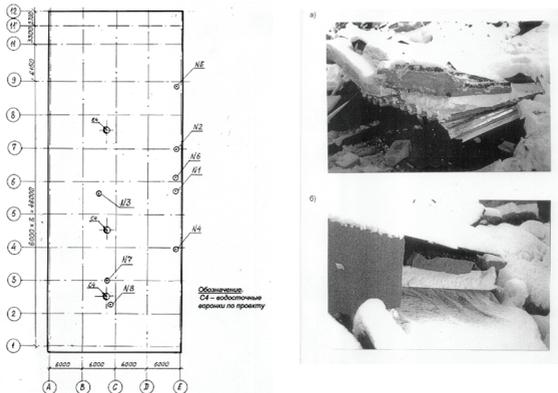


Рис. 2.3. Расположение мест замера толщины слоев кровли цеха №1 и состав
 кровли в точке №1 (а) и в точке №3 (б)

Определенная Комиссией фактическая нагрузка на стропильные фермы в момент обрушения составляла 703,4 кг/м². При этом проведенные расчеты показали, что несущая способность элементов ферм была обеспечена.

Однако при примененной конструкции опорных креплений стропильных ферм и монтажных неточностях имелись неучтенные условия для возникновения горизонтальных усилий:

- горизонтальное смещение каждого из опорных узлов ферм внутрь пролета за счет прогиба фермы;
- поворот фланцев на опорах при прогибе фермы;
- температурное укорочение стропильной фермы (при монтаже конструкций в летнее время условно при температуре +20 °С) к моменту обрушения (произошедшего при температуре -5°С).

Кроме того, сползанию опорного ребра фермы со столика могли способствовать:

- нарушение геометрических параметров каркаса здания, в частности, сверхнормативное расстояние между колоннами, которое вызывает необходимость притягивать колонны к фермам при монтаже;
- отсутствие подливки цементным раствором или обетонирования баз отдельных колонн.

Для предотвращения возможной предаварийной ситуации сотрудниками ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко было проведено детальное обследование покрытий цехов № 2, 3, 4 и 5, прилегающих к разрушившемуся цеху № 1, выполненных по аналогичным с покрытием цеха №1 конструктивным решениям. Проведены проверочные расчеты и даны рекомендации по устранению выявленных недостатков (подобных недостаткам в обрушившихся конструкциях цеха №1 – рис. 2.4).

а)



б)

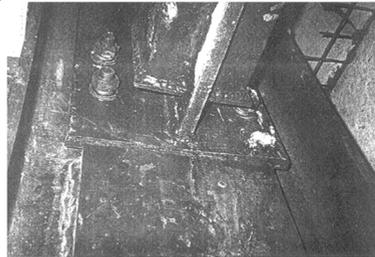


Рис. 2.4. Поворот (а) и смещение (б) опорного ребра стропильной фермы в узлах опирания на колонны в цеху № 2 завода

Конструкции из гнугосварных профилей типа «Молодечно» за последние годы (в силу своей дешевизны и удобства при изготовлении) получили широкое распространение. Однако, зачастую эти конструкции приспособливают к специфическим условиям строительства конкретного объекта, изменяют конструкции узлов опирания, стыковые узлы, конфигурацию, пролеты, положение связей, что приводит к изменению

условий работы конструкций и может привести к непредвиденным последствиям.

3. Здание хранения и оптовой торговли в Ставропольском крае

В ноябре 2012 году сотрудниками ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко было проведено обследование технического состояния смонтированных конструкций каркаса здания хранения и оптовой торговли №2, входящего в состав Агрпромышленного парка «Ставрополье», в Ставропольском крае Минераловодского района.

Необходимость в обследовании конструкций возникла в связи с произведенной экспертизой проекта, в которую входил проверочный расчет конструкций, показавший недостаточную несущую способность основных элементов.

Здание хранения и оптовой торговли №2 представляет собой каркасный корпус, состоящий из двух одноэтажных пролетов и двухэтажной пристройки с навесом к ней с одной стороны (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Общий вид здания хранения и оптовой торговли № 2



Б

А



Б

Б

Рис. 3.2. Пролет А-Б (вид на ось 1) Рис. 3.3. Пролет Б-В (вид от оси 11)

Одноэтажная часть здания имеет два пролета: А-Б, шириной 15 м (рис. 3.2), и Б-В, шириной 12м (рис. 3.3), с покрытием стропильными фермами с треугольной решеткой с нисходящими опорными раскосами и параллельными поясами с сечениями из замкнутых квадратных и прямоугольных гнутосварных профилей (типа «Молодечно»). Фермы установлены с шагом

6м и опираются на колонны из колонных двутавров, установленные с шагом 12м, или на подстропильные фермы, установленные вдоль осей А и Б.

Подстропильные фермы подобны по конструкции стропильным фермам.

Высота всех ферм в осях составляет 1,5м. На верхние пояса стропильных ферм в узлах с шагом 3 м установлены прогоны, выполненные из широкополочных двутавров. На прогоны опирается железобетонная плита по профилированному листу и кровля из утеплителя, стяжки и двух слоев техноласта.

В середине пролета А-Б имеется жесткая вставка из железобетона, предназначенная для бытовых помещений и выступающая над кровлей для установки технологического оборудования.

В покрытии пролетов А-Б и Б-В между фермами установлены связи: треугольные продольные и крестовые поперечные горизонтальные по верхним поясам, распорки по нижним поясам и вертикальные в связевых блоках.

В торцах здания в пролете А-Б установлены вертикальные связи между стойками фахверка.

Покрытия и перекрытия двухэтажной части здания в пролете В-Г, шириной 8 м, и одноэтажного навеса (пролет Г-Д) со стороны ряда Г, шириной 4 м, выполнены по схеме балочной клетки. Шаг главных балок, так же как и колонн, – 6 м. На главные балки опираются в одном уровне второстепенные балки (или прогоны) с шагом 2 м. Главные балки и прогоны выполнены из балочных двутавров. На прогонах покрытия и перекрытия в двухэтажной части устроены железобетонные плиты по профилированному листу. Стойки навеса вдоль оси Д выполнены из замкнутых гнутосварных профилей и установлены с шагом 6 м. Кровлей навеса является профилированный настил.

При освидетельствовании здания обнаружены недостатки проектных решений, требующие усиления конструкций:

1. Крестовые горизонтальные связи по покрытию «Молодечно» должны располагаться по верхним поясам ферм.
2. Не включены в проект вертикальные связи по фонарям.
3. Фахверковые стойки должны быть связаны листовыми шарнирами с верхним и нижним поясами торцевой фермы.

Некоторые недостатки проектных решений были устранены в процессе изготовления и монтажа. Так, в смонтированном здании горизонтальные связи по покрытию в уровне верхних поясов ферм выполнены, как в типовом проекте для случая решения с использованием прогонов. При этом, при нетиповом пролете стропильных ферм в 15м расположение растяжек по нижним поясам ферм и вертикальных связей между фермами не отвечало назначению этих конструкций: передаче горизонтальных усилий с торца здания вдоль пролета с торцевых стоек на покрытие и закреплению нижних свободных узлов ферм из плоскости конструкции.

Обнаружены отступления от проектных решений, которые потребовали усиления конструкций (рис. 3.4 ÷ 3.9):

1. Установленные горизонтальные растяжки и вертикальные связи между стропильными фермами расположены не в узлах ферм.
2. Установленные горизонтальные связи по верхним и нижним поясам стропильных ферм не совпадают в узлах с фахверковыми стойками.
3. Торцевые связи не доведены до нижних поясов ферм (или не имеют горизонтальных распорок между колоннами).
4. Стыки в нижних и верхних сечениях поясов ферм смещены; стыки выполнены не на фланцах.
5. Дополнительные стойки в местах установки вертикальных связей не передают усилия в узлы ферм.



Рис. 3.4. Торцевые крестовые связи между стойками фахверка по оси 11



Рис. 3.5. Стык верхнего пояса стропильной фермы Ф А-Б-4/5



Рис. 3.6. Стык нижнего пояса стропильной фермы Ф А-Б-6



Рис. 3.7. Стык главной балки в пролете В-Г (1-й этаж)

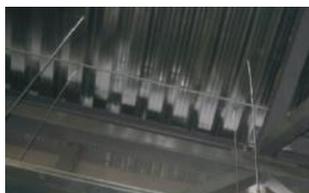


Рис. 3.8. Опираение профилированного настила на прогон широкой полкой



Рис. 3.9. Подвешенное к прогонам в пролете А-Б технологическое оборудование (охладители)

6. Стыки верхних полок балок выполнены только на сварных швах без накладок, положенных по нормам.
7. Профилированный настил уложен на прогоны широкой полкой, прикреплен к прогонам не в каждой волне и не создает жесткий диск

покрытия.

8. Прогоны установлены не в узел фермы.

9. Технологическое оборудование (охладители) подвешены в середине длины прогона.

При вскрытии кровли (рис.3.10) было обнаружено, что нагрузка от кровли незначительно меньше нагрузки, принятой в проекте.



Рис. 3.10. Вскрытие кровли в пролете Б-В

По данным проектировщиков расчет несущих конструкций здания был произведен на постоянную нагрузку 650 кг/м^2 , что вместе с временной составляет порядка 800 кг/м^2 , что незначительно больше фактической нагрузки ($755,8 \text{ кг/м}^2$). При этом некоторые запроектированные элементы конструкций покрытия не проходили по несущей способности и требовали усиления, которое при освидетельствовании конструкций еще не было осуществлено.

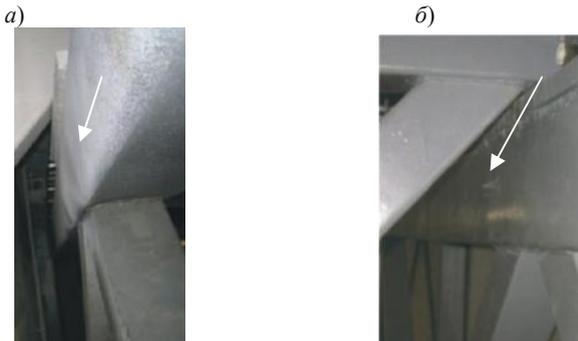


Рис. 3.11. Потеря местной устойчивости стенок сечения верхнего пояса подстропильной фермы ПФ Б 1-2 в месте опирания стропильной фермы Ф А-Б- 1/2 со стороны пролета Б-В (а) и подстропильной фермы ПФ Б 4-5 в месте опирания стропильной фермы Ф А-Б- 4/5 со стороны пролета А-Б (б)

В результате допущенных неточностей в изготовлении и монтаже конструкций и значительной их перегрузке произошла местная устойчивость стенок сечения верхних поясов подстропильных ферм (рис. 3.11).

Во время обследования для разгрузки ферм были установлены временные подпорки (на домкратах) под прогоны, опирающиеся на стропильную ферму Ф А-Б-1/2. Однако решение вопроса с перегрузкой стропильных и подстропильных ферм остался открытым.

Для приведения конструкций покрытия здания в работоспособное состояние и для обеспечения его дальнейшей безопасной эксплуатации было предложено: снять нагрузку на несущие конструкции покрытия, создать жесткий диск покрытия, горизонтальные связи по верхним поясам ферм связать с торцевыми связевыми блоками, установить продольные вертикальные связи по фонарям, установить в стропильных фермах дополнительные стойки в местах опирания растяжек по нижним поясам, усилить места стыков балок и поясов ферм и верхние пояса подстропильных ферм по ряду Б и другие мероприятия.

Следует отметить, что характер ошибок при проектировании, изготовлении и монтаже конструкций, допущенных при строительстве производственного здания в 2012 году, практически одинаковый с ошибками при проектировании и монтаже, допущенными на объектах, построенных 10 и 18 лет назад, и приведших техническое состояние конструкций в недопустимое или даже в аварийное состояние.

Особое внимание и тщательное исполнение требуют конструкции типа «Молодечно», широко используемые в последние годы в импровизированном виде для производственных зданий без кранов.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Горпинченко В.М., Егоров М.И., Гукова М.И., Искендеров В.Г., К вопросу о проектировании опорного узла металлических ферм покрытия зданий [Текст] //Промышленное и гражданское строительство № 3. 2006. М.: Издательство ПГС. С. 41-42.
2. РД 11-589-03 " Положение о проведении экспертизы промышленной безопасности опасных металлургических и коксохимических производственных объектов". М., НТЦ "Промышленная безопасность", 2004 г.