

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство»

(наименование кафедры)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Особенности работы сжатых деформированных уголкового стержней
ферм при различных вариантах усиления

Студент

А.А. Абраменко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

И.К. Родионов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент В.А. Ерышев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2019г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Д.С. Тошин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2019г.

Тольятти 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1 Состояние вопроса	5
1.1 Здания и сооружения из металлических конструкций.....	5
1.2 Общие сведения о стальных стропильных фермах	5
1.3 Техническая эксплуатация стальных стропильных ферм	9
1.4 Дефекты и повреждения стальных стропильных ферм	14
1.5 Аварии стальных конструкций.....	18
1.6 Усиление ферм	23
1.7 Анализ работ по усилению стержней ферм под нагрузкой.....	28
1.8 Основные сведения о сварке.....	32
1.9 Выводы по первой главе.....	45
Глава 2 Экспериментальное исследование	46
2.1 Методика проведения испытаний	46
2.2 Техника безопасности при выполнении сварочных работ	55
2.3 Техника безопасности при работе с гидравлическим прессом	55
2.5 Выводы по второй главе.....	61
Глава 3 Теоретическое обоснование эксперимента	63
3.1 Расчёт несущей способности эталонного стержня.....	63
3.2 Расчет несущей способности деформированного стержня	64
3.3 Расчет несущей способности усиленных стержней	66
3.4 Выводы по третьей главе	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	72

ВВЕДЕНИЕ

Для подъёма экономики России очевидна необходимость модернизации отечественной промышленности. Модернизация требует, как правило, усиления каркасов промышленных зданий, в том числе стропильных ферм покрытия со стержнями из парных уголков, скомпонованных в тавр, и листовыми фасонками. Усиление таких ферм, зачастую, достигается увеличением сечения отдельных стержней путём присоединения на сварке дополнительных стержневых элементов.

В этой связи, предлагаемая тема является актуальной.

Результаты обследований показывают, что стропильные фермы часто имеют дефекты, повреждения. Распространенным случаем повреждений являются различные общие деформации стержней, в том числе и выгибы в плоскости фермы на обушки уголков. Такие стержни требуют, как правило, усиления.

По вопросу усиления стержней были изучены различные источники (рекомендации по усилению, учебники). Результат: в литературе есть только ссылки (причём, разноречивые) на возможные схемы усиления, без методик расчёта. Причина: исследования по данному вопросу не проводились.

Научный интерес, таким образом, представляет исследование эффективности различных схем усиления.

Новизна работы заключается в постановке эксперимента и разработке методик расчёта, позволяющих достоверно определить несущую способность сжатых деформированных стержней стальных стропильных ферм покрытия при различных схемах усиления.

Была поставлена цель данного исследования: получение научного обоснования степени эффективности различных схем усиления сжатых стержней таврового сечения из парных уголков с общими деформациями на обушки.

Задачи:

1. Анализ существующих методов усиления металлических стержней стропильной фермы.

2. Экспериментальное исследование работы сжатых деформированных уголкового стержней при различных вариантах усиления.

3. Теоретическое исследование работы сжатых деформированных уголкового стержней при различных вариантах усиления.

4. Анализ результатов исследований.

Методы исследования, которые использовались в процессе выполнения работы: описание, аналогия, прогнозирование, обобщение, эксперимент.

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении сведений о работе сжатых деформированных уголкового стержней таврового сечения, усиленных при различных вариантах с применением сварки.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по усилению деформированных стержней таврового сечения с применением сварки.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

– на научно-практической конференции «Студенческие дни науки в ТГУ, 2018» – 3-е место;

– на научно-практической конференции «Студенческие дни науки в ТГУ, 2018» – два 1-х места;

– на Всероссийской студенческой научно-практической междисциплинарной конференции «Молодежь. Наука. Общество»;

– на областном конкурсе «Молодой ученый»;

– на магистерских семинарах.

Публикации.

По результатам работы над диссертацией опубликовано 3 работы

Глава 1 Состояние вопроса

1.1 Здания и сооружения из металлических конструкций

В настоящее время при возведении зданий и сооружений активно используются металлические конструкции. Это связано с рядом преимуществ данного материала: хорошая несущая способность при меньшем весе по сравнению с железобетоном, удобство монтажа, складирования, металлоконструкции обладают архитектурной выразительностью. Однако использование металлических конструкций сопряжено с рядом вопросов в плане несущих характеристик.

Россия обладает большим количеством зданий и сооружений из металлических конструкций. К ним относятся здания и сооружения как промышленного назначения, например, склады, ангары, так и гражданского – торговые центры, гаражи, павильоны. Основными несущими элементами в таких зданиях являются металлические колонны, балки, стропильные фермы. В связи с реконструкцией или модернизацией здания результаты обследования могут показать, что необходимо усилить тот или иной элемент. В данной магистерской диссертации речь пойдет об усилении стальных стропильных ферм, поэтому рассмотрим общие сведения о них, а также о дефектах, повреждениях и причинах возможных аварий.

1.2 Общие сведения о стальных стропильных фермах

Стропильные фермы – это решетчатые конструкции, выполненные из отдельных прямолинейных стержней, которые связаны в узлах в геометрически неизменяемую систему.

Стропильные фермы применяются в качестве основных несущих конструкций в покрытиях здания. Одно из самых крупных достоинств данной конструкции заключается в том, что ими можно перекрыть большие пролеты, при относительно экономичном расходе материала на изготовление ферм. Однако фермы более трудоемки в изготовлении по сравнению с балками. Это связано с

наличием большого количества узлов. Основные элементы фермы – пояса и решетка, которая состоит из стоек и раскосов.

В целом ферма работает на изгиб. За счет решетки фермы происходит объединение поясов. Обеспечивается неизменяемость системы и воспринимается поперечная сила. Узлы ферм можно рассматривать как шарнирные. В случае приложения нагрузки в узлах и если оси элементов пересекаются в их центре, то элементы ферм работают на осевые усилия – растяжение или сжатие.

Существует классификация ферм по ряду признаков:

1. По статической схеме фермы разделяются на:

- разрезные;
- неразрезные.

2. По очертанию поясов:

- треугольные,
- трапециевидные,
- с параллельными поясами,
- полигональные.

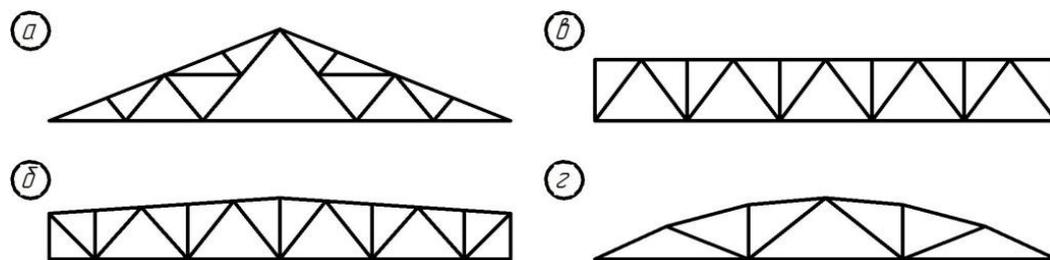
Треугольные фермы (рисунок 1а) экономичны по изготовлению, но имеют сложный опорный узел и требуют жесткие кровли; недостатком таких ферм является возможность лишь шарнирного прикрепления к колоннам – отсюда отсутствие возможности разгрузки поясов.

Трапециевидные фермы (рисунок 1б). Данный тип ферм больше соответствует эпюре изгибающих моментов, их узлы проще в исполнении, чем треугольные.

Фермы параллельными поясами (рисунок 1в). Такие фермы широко распространены в связи с простотой изготовления и укрупненной сборки, однако отстают по экономичности от треугольных и трапециевидных;

Полигональные фермы (рисунок 1г). Применяются для больших пролетов. Очертание таких ферм близко параболическому очертанию эпюры изгибающих моментов.

Очертание фермы зависит от назначения сооружения, материала и типа кровли, типа соединения колонны и фермы, вида нагрузок, статической схемы.



а – треугольная ферма; б – трапециевидальная ферма;
в – ферма с параллельными поясами; г – полигональная ферма

Рисунок 1 – Основные очертания поясов ферм

По системе решетки классификация следующая: треугольная, раскосная, шпренгельная, крестовая, ромбическая и полуромбическая.

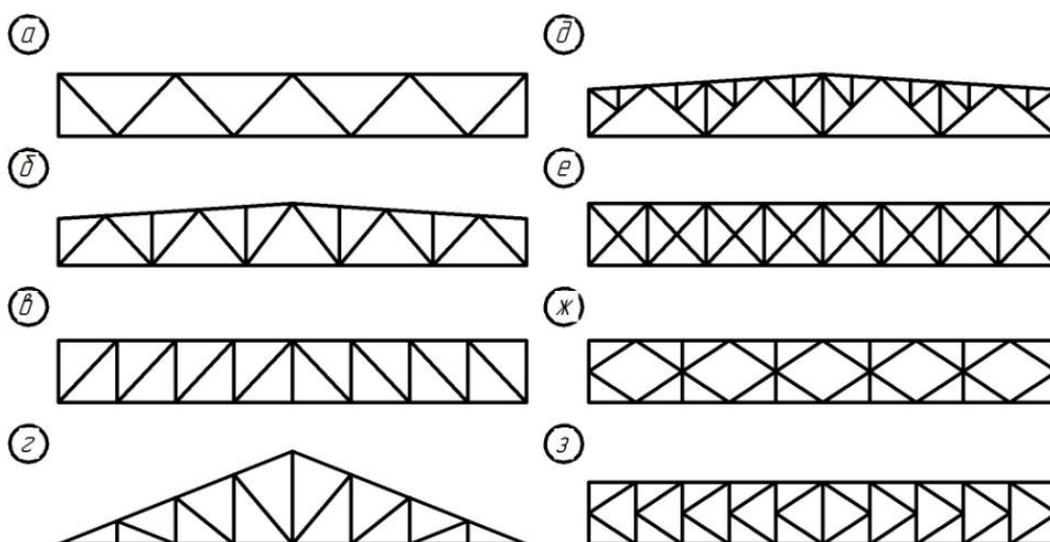
Треугольная решетка (рисунок 2а). Данная система достаточно экономична в связи с наименьшей суммарной длиной элементов и наименьшим числом узлов, однако в такой решетке длинные сжатые раскосы.

Раскосная решётка (рисунок 2в,г). Данный тип решетки применяется при малой высоте фермы, а также когда присутствуют большие узловые нагрузки. Данная система более трудоемка и металлоемка в сравнении с треугольной.

Шпренгельная решетка (рисунок 2д). Данный тип решетки позволяет исключить местный изгиб элементов пояса в местах, где приложена сосредоточенная сила, а также позволяет уменьшить расчетную длину элементов.

Крестовая решетка (рисунок 2е). Используется в связях и при наличии двухсторонней нагрузки, например, в опорах ЛЭП, гидротехнических затворах.

Ромбическая (рисунок 2ж) и полуромбическая (рисунок 2з) решётка. Используются при возведении мостов, башен, мачт. Данный тип решетки обладает большой жесткостью за счет двух систем раскосов.



а – треугольная; б,в,г – раскосная; д – шпренгельная; е – крестовая;
ж – ромбическая; з – полуромбическая

Рисунок 2 – Системы решеток

По величине максимальных усилий в стержнях фермы разделяют на легкие (усилия $N \leq 3000$ кН) и тяжелые ($N > 3000$ кН). Тяжелые фермы отличаются от легких более мощным сечением стержней, составленных из нескольких элементов.

Типы сечений стержней стропильных ферм представлены на рисунке 3.

а) трубчатое – используется для высоких сооружений в связи с хорошей обтекаемостью трубы и вследствие низким ветровым давлением. Также трубы стойки к коррозии в связи с тем, что на них мало задерживается влага;

б) прямоугольные гнуто замкнутые сечения;

в) уголки (составной тавр, крестовое сечение) – наиболее распространенные сечения в связи с большим диапазоном площадей, а также удобством для конструирования.

При больших пролетах необходима повышенная жесткость стержней. В этом случае применяются стержни имеющие развитие из плоскости фермы.

В поясах возможно применение тавровых сечений, позволяющих получить экономию в результате уменьшения расхода металла на фасонки.

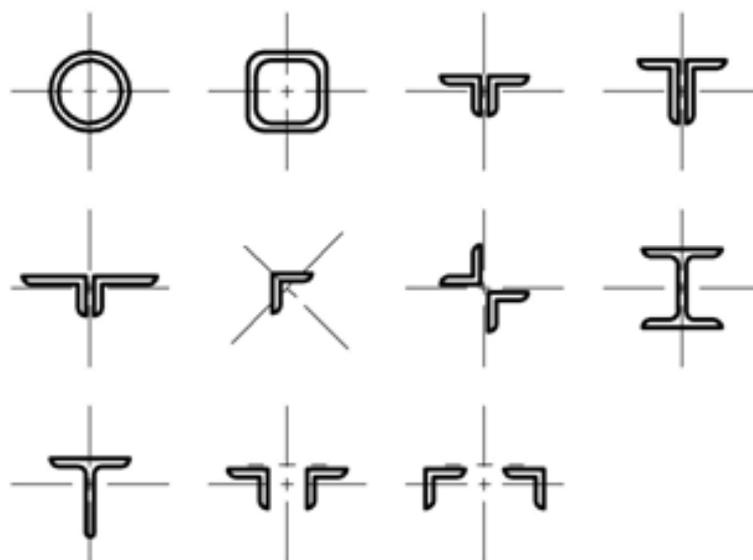


Рисунок 3 – Типы сечений стальных ферм

1.3 Техническая эксплуатация стальных стропильных ферм

Под технической эксплуатацией металлических конструкций зданий и сооружений, которые носят производственный характер, понимается совокупность специальных мер, которые позволят обеспечить работу конструкции в течении срока эксплуатации. Под сроком эксплуатации конструкции подразумевается срок работы, указанный в проектной документации. К данным мероприятиям можно отнести следующие мероприятия: проведение осмотра конструкций, проведение контроля нагрузок, воспринимаемых конструкцией, проведение контроля эксплуатационного температурного режима, проведение контроля за агрессивностью среды,

Проведение осмотра конструкций. Цель осмотра – выявление различных дефектов, повреждений, отклонений. Они могут возникать на протяжении срока эксплуатации конструкции.

Проведение контроля нагрузок, воспринимаемых конструкцией. Необходимо соблюдать нагрузки, которые были рассчитаны в проекте.

Проведение контроля эксплуатационного температурного режима. При различных повреждениях ограждающих конструкций, отключении отопления, необходимо, чтобы соблюдался эксплуатационный температурный режим.

Особое внимание следует уделять контролю за агрессивностью среды.

Кроме того необходимо соблюдать своевременность капитального и текущего ремонта. При ремонте необходимо осуществлять контроль за качеством проведения работ.

Необходимо соблюдать четкое оформление и ведение документации на всех этапах возведения конструкций и их эксплуатации.

Необходимые документы:

1) акт сдачи - приемки работ, который подтверждает выполнение работ согласно договору;

2) паспорта сооружений и зданий, в которых отражается все характеристика здания, размеры, материалы, из которого выполнено здание;

3) журнал работ по монтажу, в котором указывается конструкция, даты начала и окончания работ;

4) чертежи проекта – графическое изображение, выполненные в масштабе;

5) акт скрытых работ – составляется, когда невозможно оценить качество выполнения работ в связи с недоступностью конструкции после выполнения работ;

6) журнал авторского надзора – в этот журнал специалист заносит все недостатки, обнаруженные во время строительства. Выполняется визуально.

Если невозможно определить качество конструкции визуально – прибегают к инструментальному обследованию.

Модернизация конструкции, ее изменение, могут быть произведены только в случае, если все вышеперечисленные документы оформлены согласно правилам. Данные правила можно найти в справочно-нормативной литературе.

Согласно [2] износ металлических конструкций зависит от нескольких факторов:

1. Условия эксплуатации – это те условия, в которых эксплуатируется конструкция или сооружение;

2. Длительность эксплуатации – время на которое рассчитано использование здания по его назначению согласно проектной документации;
3. Значение нагрузок, при которых происходит воздействие;
4. Интенсивность нагрузок, при которых происходит воздействие.

Частым случаем является отклонение от проектных значений нагрузок. Чтобы определить реальную величину нагрузки прибегают к следующим методам:

- 1) производят анализ всей технической документации – чертежей, актов скрытых работ, паспорта здания и т.д.;

- 2) уточняют параметры, при которых происходит технологический процесс. К ним могут относиться такие показатели как точность, стабильность и др.;

- 3) изучаются метеорологические условия, к которым относятся температура и влажность воздуха, при которой происходит эксплуатация здания, атмосферное давление;

- 4) изучаются результаты натурного освидетельствования – осмотра зданий и сооружений, при которых могут использоваться измерительные приборы; производится обследование для выявления дефектов и повреждений конструкций.

В расчет берутся следующие нагрузки:

- 1) технологическое оборудование дает динамические и статические нагрузки; изучаются их величины и места приложения;

- 2) готовая продукция, различные материалы и полуфабрикаты могут складироваться в большом количестве и давать нагрузку; изучается их величина и место приложения;

- 3) при работе мостовых, подвесных и консольных кранов также создается динамическая нагрузка, которую необходимо учесть при определении реальной нагрузки на здание; для этого исследуется режим работы и грузоподъемность данных кранов;

4) с течением времени на конструкциях может накапливаться пыль, которая создает дополнительную нагрузку; необходимо изучить скорость накопления пылевых отложений, их вес, состав;

5) в зимний период времени зачастую происходит накопление снеговых и пылеснеговых отложений на покрытиях; эти отложения также необходимо учесть.

В процессе эксплуатации здания или сооружения подвергаются различным воздействиям. Ниже перечислены основные воздействия:

1) температурное воздействие; определяется климатическими условиями, а так же возможны производственные тепловые воздействия, например, при работе с электродуговыми печами.

Интенсивность температурных воздействий зависит от следующих факторов:

- тип здания (отапливаемое или неотапливаемое);
- габариты;
- вид источников тепловыделения и технологических процессов;
- системы вентиляции.

2) если вблизи здания совершаются работы по отрывке котлована или имеют место грунтовые воды, либо осуществляется производство работ по монтажу подземных конструкций - возможно наблюдение смещения фундамента;

3) возможно увеличение содержания агрессивных для конструкции газов в воздухе, пыли, жидкостей, увеличение абразивного воздействия сыпучих сред, например при утечке газа или изменении климата.

На основании всех произведенных исследований по нагрузкам и воздействиям на здание или сооружение производится зонирование. Цель данного мероприятия – определить условия, в которых работает конструкция, для того, чтобы установить периодичность осмотров, обследований с целью выявления отклонений, а так же составления расписания капитального и текущего ремонтов конструкции – предупредительного, капитального и текущего и ремонта.

Зонирование по интенсивности нагрузок отражает:

- 1) места, в которых может быть установлено оборудование; указываются габариты и вес технологического оборудования;
- 2) места складирования материалов, полуфабрикатов, конструкций; указываются габариты и предельная высота штабеля;
- 3) места, в которых предусмотрен проезд различного транспорта, например, погрузчика или грузового автомобиля; указываются габариты и грузоподъемность данного транспортного средства;
- 4) места, в которых будет производиться работы различных типов кранов; регламентируется согласно нормативной литературе.

Зонирование согласно интенсивности температурных воздействий отражает:

1. Максимальную температуру, до которой может разогреться конструкция при эксплуатации и работе технологического оборудования. Различают слабую (нагрев конструкций до 50°C), среднюю (нагрев до 100°C) и сильную (нагрев свыше 100°C).

2. Минимальная температура, до которой может охладиться конструкция. Замеры данной температуры происходят в зимнее время, когда происходит остановка производства и технологическое оборудование перестает выделять тепло.

Разбивка зон по степени агрессивности воздушной среды производится согласно течению скорости коррозии. Разбивка представлена ниже:

- 1) зона с нормальными условиями;
- 2) зона со слабой коррозией (скорость коррозии $0,05$ мм/год);
- 3) зона со средней коррозией (скорость коррозии до $0,1$ мм/год);
- 4) зона с сильной степенью агрессивности среды (скорость коррозии $0,5$ мм/год и более).

Чтобы определить зоны, в которых происходит перемещение фундаментов прибегают к геодезической съемке. В дальнейшем устанавливают наблюдение за перемещением фундаментов.

Зоны, которые выделяются по воздействиям и нагрузкам как особые, наносятся на план здания или сооружения. Для каждой зоны определяется номер. На чертежах их выделают штриховкой или краской.

В соответствующее примечание заносятся численные величины параметров опасных воздействий и нагрузок. Также в примечание вносится перечень характерных возможных повреждений элементов конструкций.

Наиболее эффективный способ систематизации, хранения и обработки информации о состоянии конструкции является компьютерная база данных. В любой момент можно посмотреть историю записей о состоянии конструкции или дополнить существующие.

1.4 Дефекты и повреждения стальных стропильных ферм

Качество изготовления металлических конструкций регламентируется в СП и ГОСТ.

Однако не исключены ошибки проектирования и низкое качество изготовления, что приводит к дефектам и повреждениям изделия.

Под дефектами понимаются несовершенства конструкции, которые были образованы на этапе изготовления конструкции, например, для металлической конструкции – ослабление поперечного сечения при неправильной отливке. Повреждения же образуются в процессе эксплуатации, например потеря устойчивости стержня фермы. Повреждения можно разделить на следующие группы, в зависимости от воздействия:

1. Механические повреждения. Возникают при механических воздействиях на конструкцию. К ним можно отнести потерю устойчивости различных элементов, разрыв конструкции, трещины, истирание;

2. Температурные повреждения. Возникают под воздействием слишком высоких или слишком низких температур по отношению к нормальным условиям эксплуатации. При низких температурах появляются хрупкие трещины;

- 3) Химические и электрохимические повреждения. Возможно под воздействием агрессивных для конструкции сред. Данный тип повреждения пред-

ставляет собой коррозию металла. Подробное описание типов коррозии представлено ниже.

Одним из самых распространенных и опасных дефектов стальных стропильных ферм является общий изгиб сжатых стержней. На рисунке 4 представлена схема данной деформации.

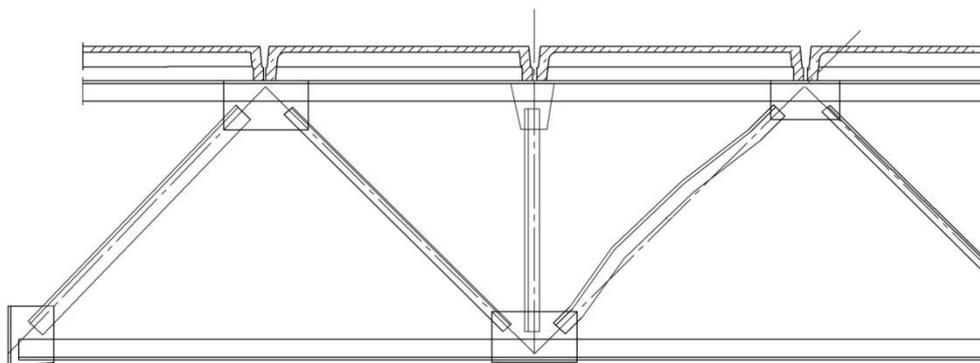


Рисунок 4 – Общие деформации (выгиб) сжатого стержня

Обследования конструкций показывают также, что довольно часто сжатые стержни ферм имеют местные деформации полок уголков, смалкование и размалкование. Это может привести к потере устойчивости таких стержней и, таким образом, к обрушению покрытия.

Зачастую причиной аварийного состояния может являться коррозия металла. Основные виды коррозии металла:

1. Сплошная коррозия. Характерна для стали в любых средах, в которых коррозионная защита металла недостаточно высока. Коррозия равномерно проникает вглубь металла, толщина сечения элемента уменьшается. Сплошная коррозия представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Сплошная коррозия узла фермы

2. Коррозия пятнами. Возможно появление в алюминиевых конструкциях и покрытий из цинка. В таких случаях коррозия может быть вызвана случайными факторами, такими как повышение влаги при протекании, выпадение конденсата, накопления солей. При выявлении такого типа коррозии необходимо выявить и устранить источники ее появления.

3. Язвенная коррозия. Возможно появление в низколегированных сталях и углеродистых сталях. Наблюдается появление при эксплуатации в грунтах и влажных средах. На поверхности начинают появляться повреждения, глубина которых может достигать от 0.1 миллиметра до нескольких миллиметров. Язвенная коррозия при несвоевременных мероприятиях по устранению может преобразоваться в сквозную, при этом будут появляться отверстия. Такой тип коррозии сильно концентрирует напряжения серьезный концентратор напряжений и может оказаться причиной трещин и разрушений. Чтобы определить скорость развития данной коррозии, определяют среднюю скорость ее проникновения и количество повреждений металла на единицу площади.

4. Точечная коррозия. Характерна для алюминиевых сплавов, а так же нержавеющей стали. Представляет собой разрушение в виде отдельных мелких и глубоких язв.

5. Межкристаллитная коррозия. Наблюдается появление в алюминиевых конструкциях и нержавеющей стали. Распространенные места появления – участки сварки. В местах, где появляется данный вид коррозии, можно наблюдать наличие большого количества трещин.

6. Коррозионное растрескивание. Наблюдается появление в сталях, а также алюминиевых сплавов при воздействии агрессивных по отношению к конструкции сред, а так же напряжений растяжения. Коррозию можно обнаружить по появлению большого количества трещин. На рис. 6 показано коррозионное растрескивание.



Рисунок 6 – Коррозионное растрескивание

7. Коррозионная усталость. Возникает когда наблюдается воздействие агрессивных для материала жидких сред, а так же повторяющихся напряжений. Внешние проявления схожи с коррозионным растрескиванием. Интенсивность данного типа коррозии определяется в соответствии с количеством циклов, которое элементы конструкции могут выдержать прежде чем начнут появляться трещины. На рисунке 7 представлены усталостные трещины.

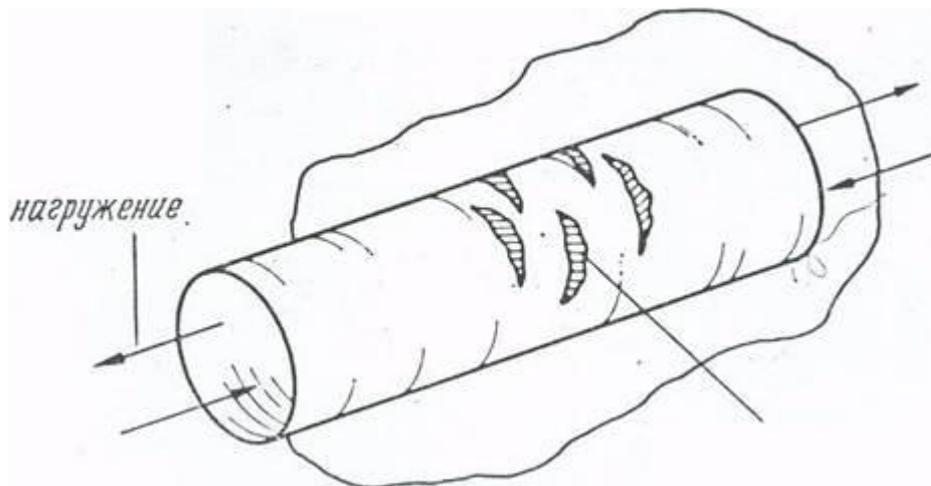


Рисунок 7 – Усталостные трещины

8. Расслаивающая коррозия. Наблюдается появление в алюминиевых сплавах. Характеризуется разделением металла. Внешне представляет собой разделение металла по границам зерен в плоскостях, параллельных плоскости горячей деформации (прокатки, прессования, экструзии и т.д.).

9. Контактная (гальваническая) коррозия. Характеризуется резким увеличением глубины проникновения сплошной коррозии одного из двух разнородных металлов или сплавов, между которыми существует электрический контакт.

1.5 Аварии стальных конструкций

Советский исследователь Ф. Д. Дмитриев [7] разработал классификацию аварий стальных конструкций. Причины аварий, согласно его классификации, разделяются на три основные группы:

- крушения, вызываемые ураганом, наводнениями, землетрясениями и др. катаклизмами;
- крушения, вызываемые неидеальными инженерно-техническими решениями;
- крушения, вызываемые социально-экономическими условиями.

Технические причины катастроф можно разделить на следующие группы:

- дефекты оснований;

- потеря устойчивости;
- неудовлетворительное производство работ.

Мизюмский А.И. [15] разработал классификацию крушений и аварий, где рассматриваются аварии металлических конструкций, вызванные инженерно-техническими причинами:

- аварии вызванные дефектами в результате ошибок проектирования;
- аварии вызванные дефектами в результате ошибок при производстве работ;
- аварии, вызванные дефектами в результате эксплуатации;
- аварии, вызванные недостаточной изученностью материалов, их условий работы и свойств.

Прочность металлических конструкций и сооружений зависит от многих факторов:

- марка материала;
- сечение конструкции;
- форма конструкции;
- качество изготовления и монтажа;
- условия эксплуатации их формы;
- своевременный ремонт;
- усиление конструкций при необходимости.

Вышеперечисленные условия значительно увеличивают срок нормальной эксплуатации, несущую способность конструкций и их отдельных элементов. Любые аварии конструкций можно рассматривать как совокупность нескольких причин, сочетание неблагоприятных факторов.

В большинстве случаев, когда обрушение конструкции происходит полностью, определение причины аварии затруднительно. Например, при обследовании обрушившихся стропильных ферм покрытия можно наблюдать потерю устойчивости элементов фермы при эксплуатации. Однако при более детальном осмотре и анализе может быть определено, что потеря устойчивости произошла при обрушении, а истинной причиной аварии послужили другие факторы.

Первостепенное значение имеет установление основной причины аварии в каждом из случаев. В строительной практике существуют случаи, когда неверное установление главной причины аварии влекло к повтору ее в том же месте. Во время изучений аварий необходимо абсолютно точно разграничивать основную причину от непосредственной причины, которой вызывается авария. На рисунке 8 показана потеря несущей способности легких ферм покрытия ангара.

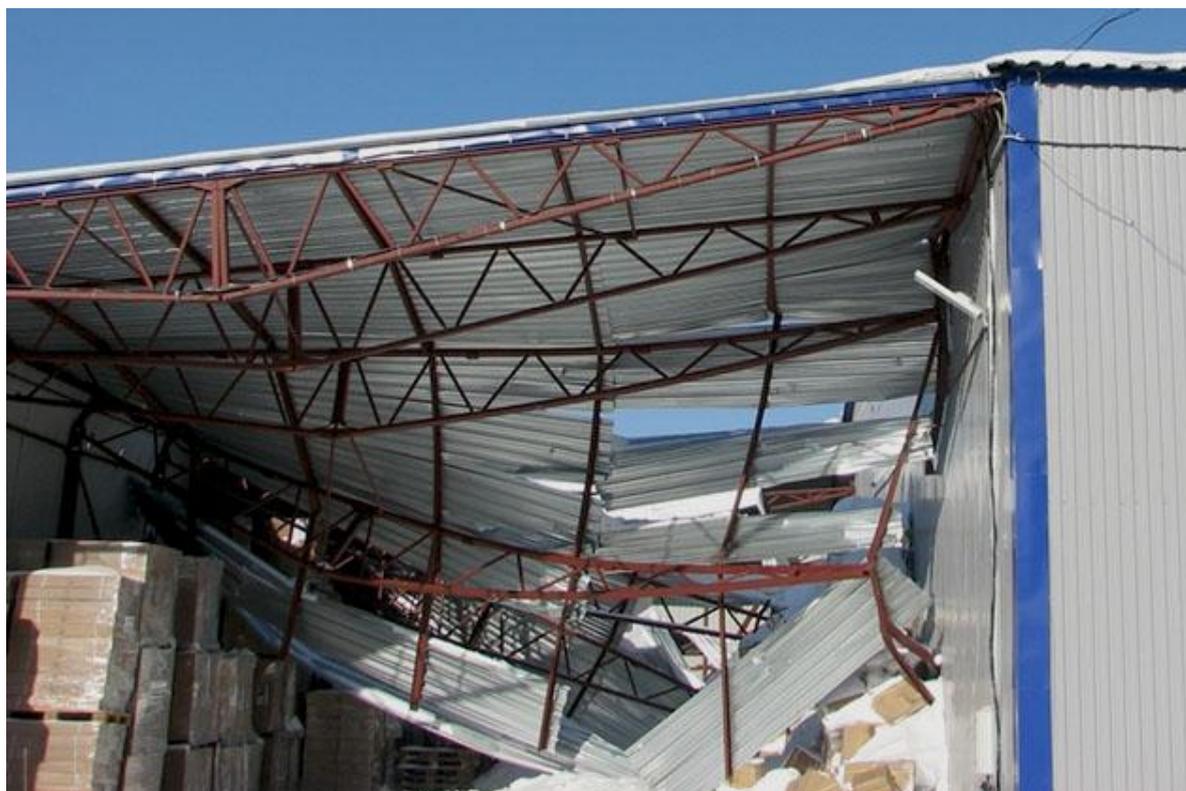


Рисунок 8 – Обрушение покрытия ангара

Авария произошла в результате значительной перегрузки, возможность появления которой не была учтена при проектировании.

Ниже приведены примеры аварий, происшедших в результате обрушения несущих конструкций покрытия.

1) Обрушение семи стропильных ферм прессового цеха металлургического завода.

По результатам обследования была установлена причина обрушения – нарушения при монтаже и нарушения при эксплуатации здания. Было установ-

лено, что сварка узлов ферм была произведена некачественно. Обрушение ферм вызвалось низким качеством сварки опорных узлов, срезом одной из опорных фасонок по швам на торцовом листе и превышающие нагрузки на опорные узлы. Осмотр показал, что у трех ферм наблюдались деформации по сжатым раскосам со стрелой выгиба до 200 мм.

Они были усилены. При усилении старались выдержать все проектные размеры конструкции, однако при монтаже были допущены грубые ошибки, что привело к изгибу фасонок и появлению в них в дальнейшем трещин, которые способствовали аварии.

2) Завод металлоконструкций в Нижнем Тагиле.

Аварийная ситуация произошла из-за выгиба стержня фермы. Стрелка выгиба была равна 400 мм. Также были деформированы верхний и нижний пояса ферм. По результатам обследования было установлено, что причинами аварии являлись неразрезной характер ферм, дополнительная нагрузка от фонаря и превышенная нормой снеговая нагрузка.

Авария позволила сделать вывод, что нельзя допускать лишних закреплений, что приводит к перераспределению усилий в стропильной ферме. Необходимо точное соответствие конструктивных решений с расчетной схемой.

3) Авария печного корпуса Куйбышевского цементного завода в городе Жигулевске.

Авария произошла ранним утром. Обрушение стропильных ферм произошло вследствие больших усилий в нижних сжатых поясах ферм. К этому привело болтовое соединение верхних поясов ферм в смежных пролетах, что привело к неразрезной схеме фермы. Существовал второй фактор – повышенная нагрузка от цементной пыли. Пыль поступала наружу через аэрационные фонари и оседала на кровле. Слой пыли в некоторых местах был порядка 80 см. Пыль счищалась очень редко. Данные факторы были причиной аварии.

4) Завод «Ленинская кузница», сборочный корпус.

Авария произошла из-за отрыва фасонок. Причиной отрыва было установлено некачественное выполнение сварных швов. «Торцовые планки оста-

лись прикрепленными к колоннам болтами, а во многих случаях и сварными швами по продольным кромкам. Такая приварка торцовых планок разрешалась авторским надзором при неплотном прилегании их к полкам колонн»[2].

5) Склад руды, обрушение блока из двух стропильных ферм.

Обрушение блока стропильных ферм склада руды и концентрата. «Металлические фермы пролетом 36 м имеют ломанный верхний сжатый пояс и вставку в средней части фермы в виде жесткой замкнутой стальной рамы, к нижнему поясу которой крепится транспортерная галерея» [2]. Узлы нижнего пояса были присоединены к раме при помощи листовых шарниров. Узлы верхнего пояса выполнены при таком же конструктивном решении. В результате этого в плоскости фермы пояса не обладали непрерывной жесткостью. Такое конструктивное решение является неприемлемым, так как в случае даже самых малых усилий ферма может потерять устойчивость. Кроме того в местах болтовых соединений монтажных связей не было установлены все болты, а некоторые связи крепились только на проволоке. Данное закрепление не было проконтролировано авторским надзором. Обрушение произошло после монтажа. По словам рабочих, сначала блок качнулся, а затем произошла потеря устойчивости нижних поясов стропильных ферм. Конструкция медленно начала разрушаться. Проведенное обследование показало следующее: «Стропильные фермы изготовлены из прокатной стали марок ВМ Ст3пс и, частично, ВМ Ст3сп, сварка производилась электродами типа Э-42 на заводе-изготовителе конструкций (марка АНО-4) и электродами Э-42А при монтаже (марки СМ11 и ДСК50)» [2]. «При тщательном осмотре всех деформированных и разрушенных элементов хрупких разрушений основного металла, сварных швов и околошовных зон не обнаружено, все разрывы и деформации имеют признаки пластической стадии разрушения» [2]. «Заводские швы в большинстве соединений выполнены удовлетворительно, однако в отдельных местах имеются отклонения от проекта, как например: в ферме по оси 11 раскос приварен со стороны обушка швом катетом меньше проектного на 4 мм. Основной причиной обрушения блока стропильных ферм является недостаточное прикрепление его дополнительными

монтажными связями к ранее установленному связевому блоку, поэтому гибкость верхнего ломаного сжатого пояса из плоскости фермы превышала допустимую, вследствие чего и произошла потеря его устойчивости из плоскости фермы» [2].

1.6 Усиление ферм

Можно отметить несколько случаев, когда требуется усиление ферм:

- 1) Когда увеличиваются нагрузки, создаваемые покрытием;
- 2) Когда увеличивается нагрузка от снега. Это может быть в том случае, если пристраивается новое здание, из-за которого возможно образование снегового мешка;
- 3) Когда к стропильным фермам покрытия монтируется дополнительное оборудование, например, трубопроводы;
- 4) Когда происходит повышение грузоподъемности кранов или устанавливается новое крановое оборудование;
- 5) Когда происходит разрушение сечения. Такие ситуации могут возникать из-за коррозии механических повреждений.

Формула для определения устойчивости стержней представлен ниже:

$$e_0 = F_N \left[1 - \frac{N}{N_3} \right], \quad (1)$$

где F_N – стрелка искривления стержня, которая была получена в результате обследования; N – продольная сила в стержне, при которой производилось измерение стрелки искривления; N_3 – критическая сила. Может быть определена по формуле Эйлера.

Существует большое множество способов усиления. Наиболее распространенным является метод увеличения сечений. Основная суть данного метода – увеличение радиуса инерции сечения. Усиление производится путем включения в работу с помощью сварки и болтов элемента усиления и деформированного элемента. При усилении растянутого стержня необходимо заводить на фансонки элемент усиления. При усилении сжатого стержня необязательно заво-

дуть на фасонки в случае, если достигается прочность усиливаемых элементов. На рисунке 9 представлены схемы усиления уголковых стержней способом увеличения сечения.

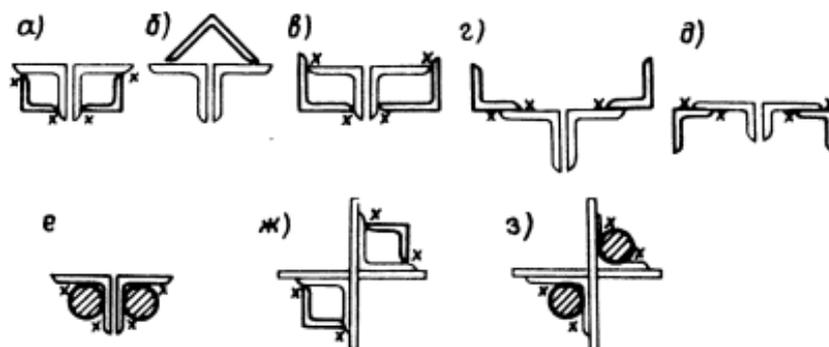
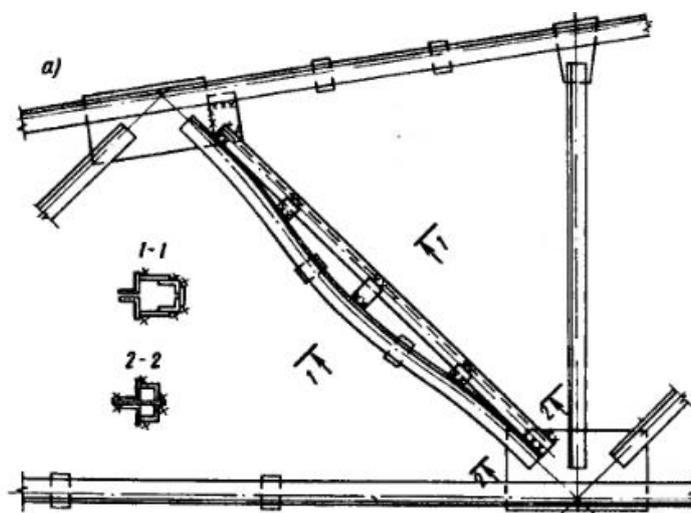
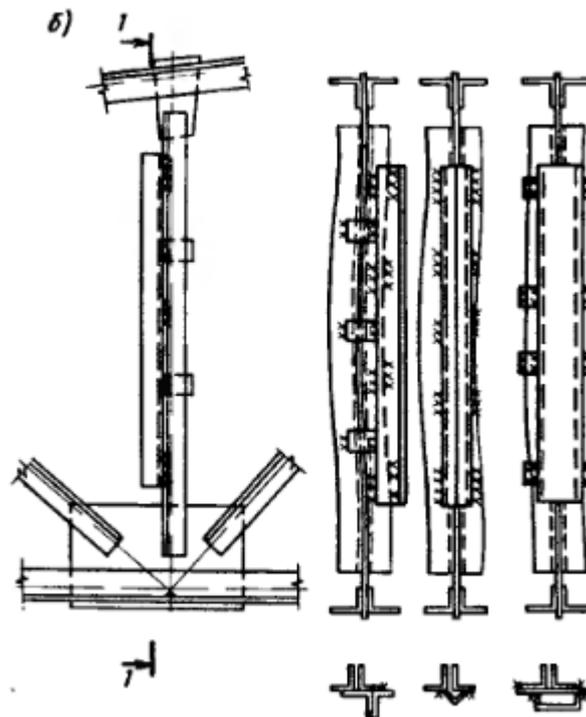


Рисунок 9 – Усиление уголковых стержней ферм

Наиболее рациональными схемами усиления для сжатых стержней являются схемы а, в, г, ж. В них наблюдается максимальное увеличение радиуса инерции. Самым удобным способом является усиление б. На рисунке 10 представлены схемы усиления.





а – при искривлении в плоскости фермы;

б – при искривлении из плоскости фермы

Рисунок 10 – Усиление стержней ферм

Усиление сварных швов устраивается путем увеличения высоты и длины шва. Для этого может потребоваться устройство дополнительных фасонки. На рисунке 11 представлено усиление сварных швов.

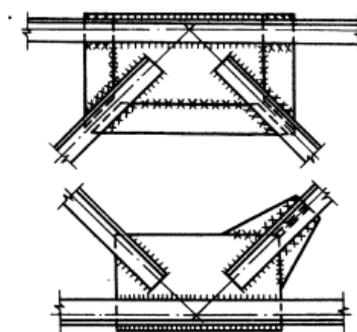


Рисунок 11 – Усиление швов в узлах фермы

Участок шва в месте расплавления выключается из работы. Если в этом случае напряжение в шве $< R_{у.ш.}$, то усиление производится путем увеличения

высоты шва. Усиление производится путем наплавки шва толщиной 2 мм; при этом существуют ограничения по высоте шва:

по обушку $k_{ш.ус}^{об} \leq 1,2t_{уг}$

по перу $k_{ш.ус}^п \leq t_{уг} - 1\text{мм.}$

В момент производства усиления прочность шва рассчитывается по формуле:

$$\tau_{ш} = N_{ш} / [\beta_{ш} l_{ш} - A k_{ш}] \leq R_{у.ш.}, \quad (2)$$

где $N_{ш}$ — усилие, возникающее в шве в момент усиления; $l_{ш}$ — длина шва; A — длина участка шва, который выключается из работы во время усиления. В зависимости от увеличения длины шва принимаются следующие значения:

- 1) Если увеличение происходит на 6-8 мм – 3 см;
- 2) Если увеличение происходит на 8-10 мм – 4 см;
- 3) Если увеличение происходит на 10-12 мм – 5 см.

На рисунке 12 представлено усиление узлов ферм.

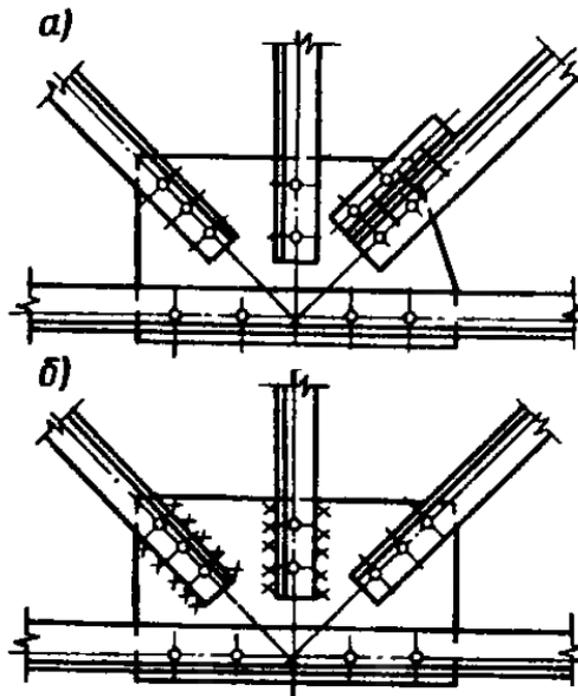
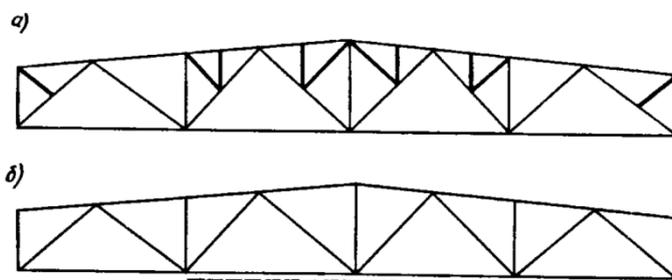


Рисунок 12 – Усиление узлов ферм

Следующий тип усиления – изменение конструктивной схемы. Усиление производится как отдельных стержней так и фермы целиком. На рисунке 13а представлено усиление путем устройства шпренгелей, которые уменьшают расчетную длину стержней стальной стропильной фермы.



а – устройство шпренгелей,

б – установка растяжек на растянутый нижний пояс

Рисунок 13 – Усиление фермы с помощью изменения конструктивной схемы.

На рисунке 13б представлен способ усиления растянутого пояса фермы путем установки растяжки.

Способ изменения конструктивной схемы хорошо использовать, когда необходимо произвести общее усиление фермы, так как с помощью этого способа происходит распределение усилий по всем элементам.

Если использовать предварительное напряжение, то эффективность регулирования усилий в элементах возрастает. Зачастую, изменение конструктивной схемы влечет за собой усиление отдельных элементов фермы. Для того, чтобы усиление было экономичным по расходу металла, рационально комбинировать различные схемы увеличения сечений.

Одним из простейших способов является обеспечение неразрезности. Рационально при это включить в работу фонарь.

Если происходит установка кранового оборудования или увеличение грузоподъемности уже имеющихся кранов, то необходимо установить связи, которые будут перераспределять нагрузку между фермами.

На рисунке 14 также представлены способы изменения конструктивных схем.

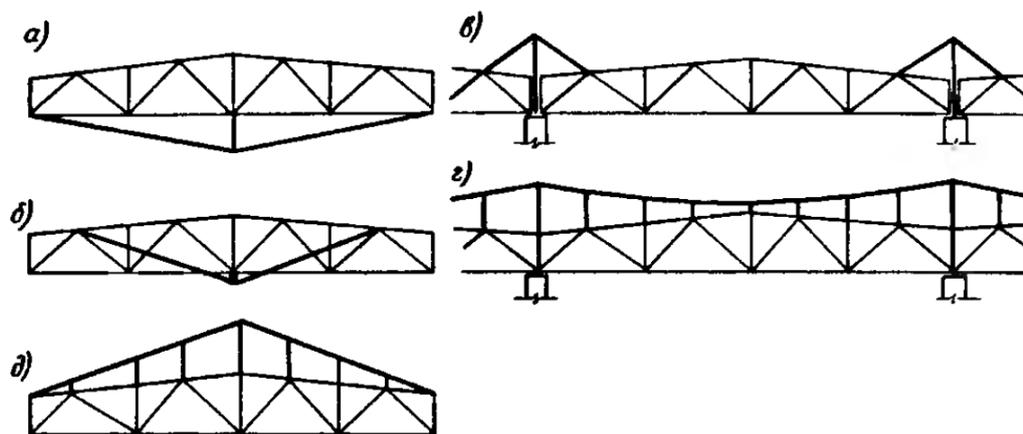


Рисунок 14 – Усиления фермы путем изменения конструктивной схемы

Выбор способа усиления происходит в зависимости от назначения здания и условий его эксплуатации. Так, если существует свободное пространство под фермой, можно использовать схему на рисунке 14а. При работе мостовых кранов рационально использование схемы, представленной на рисунке 14б.

Если производить усиление по схемам, представленным на рисунке 14 в,г, то необходимо учесть дополнительные факторы, увеличивающие трудоемкость работы по усилению:

- 1) Необходимо вскрывать кровлю;
- 2) Необходимо устраивать антикоррозионную защиту участков, которые располагаются на открытом воздухе.

При усилении по схеме, представленной на рис. 14д, необходимо устраивать дополнительные связи, чтобы сохранить устойчивость арочной системы из плоскости фермы.

1.7 Анализ работ по усилению стержней ферм под нагрузкой

В научном труде [5] приведены несколько схем по усилению стержней стальных стропильных ферм. На рисунке 16 показаны различные схемы, которые позволяют усиливать прямые стержни стальной стропильной фермы.

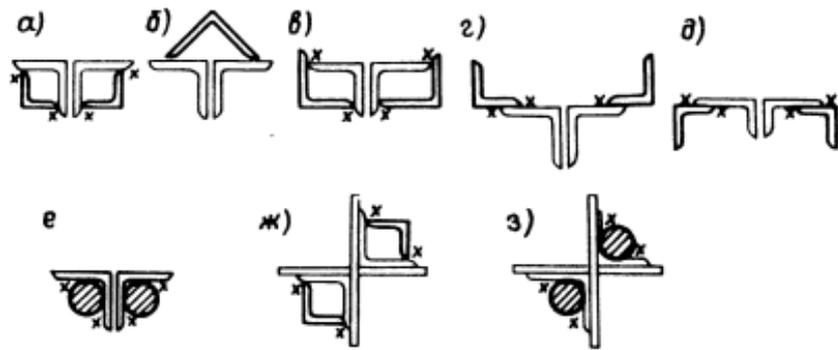


Рисунок 16 – Различные схемы усиления прямых уголкового стержней фермы

Наиболее оптимальный результат дают схемы *a, в, г, ж* в связи с максимальным увеличением радиуса инерции. Схема усиления деформированного стержня представлена на рисунке 17.

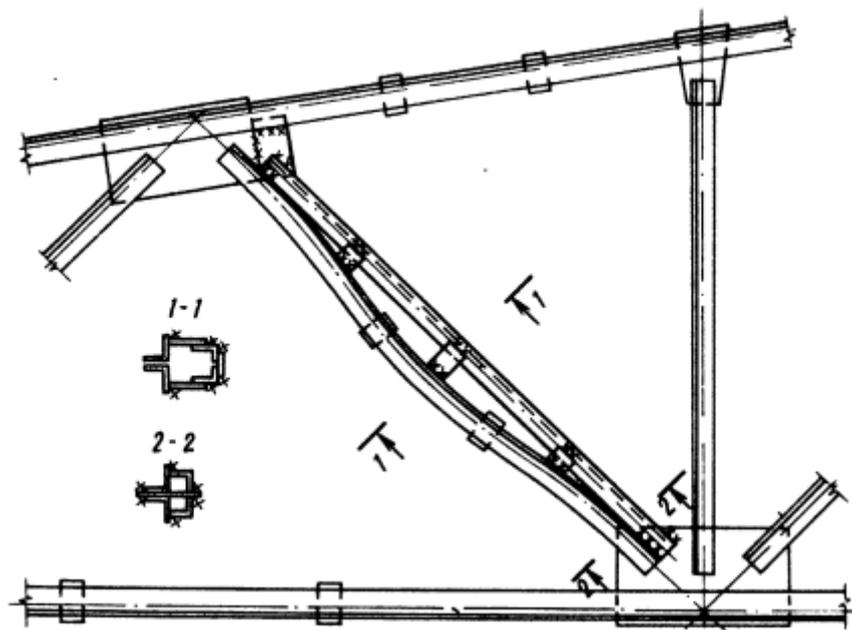


Рисунок 17 – Схема усиления деформированного стержня

С помощью этой схемы усиления уменьшается эксцентриситет действия продольной силы.

Рассмотрим следующий вариант, представленный в справочнике [34]. В данной работе рассматривается усиление деформированных стержней с помощью коротких элементов. На рисунке 18 представлена схема данного типа усиления.

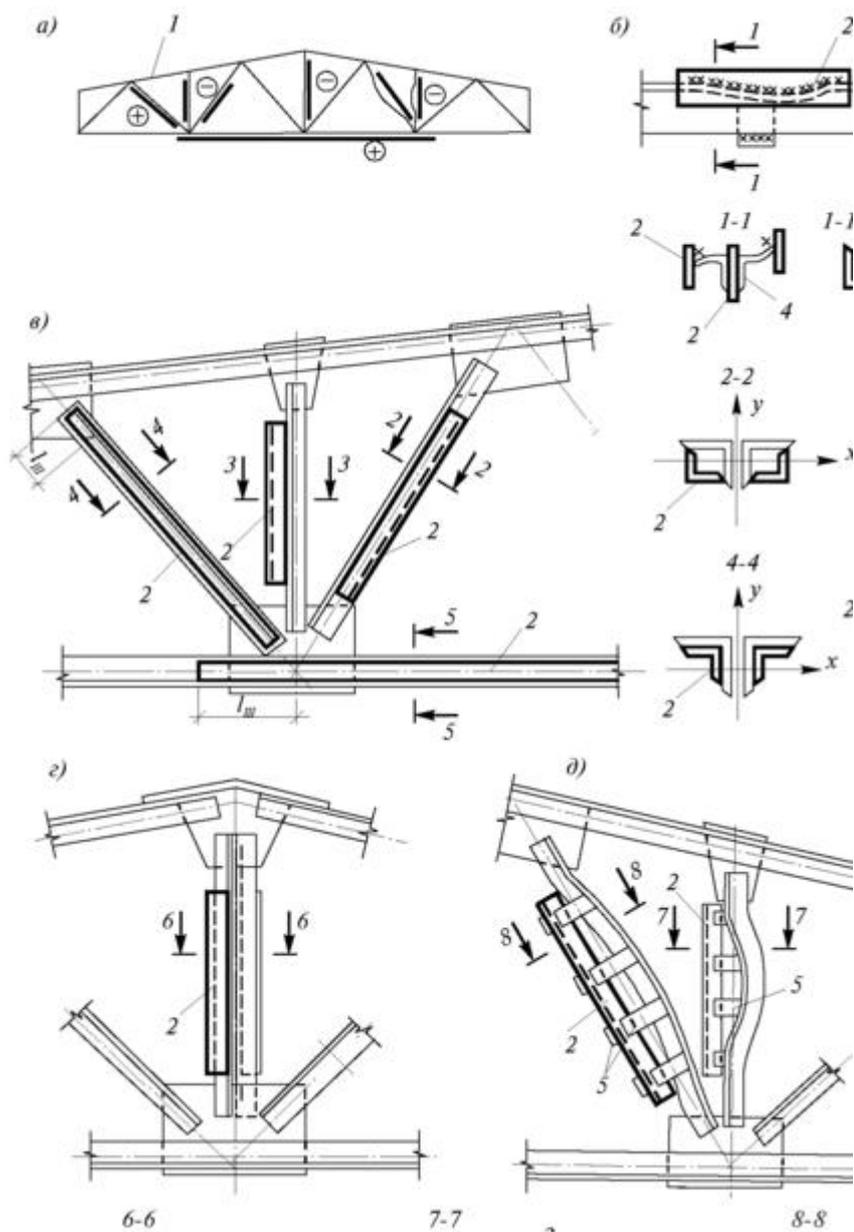


Рисунок 18 – Усиление деформированного стержня короткими элементами

В работе не было найдено каких-либо данных об исследовании эффективности данного способа.

В магистерской работе Батыревой И.А. рассматривалось усиление под нагрузкой уголкового составного стержня таврового сечения, имеющего выгиб в плоскости фермы в направлении на обушки. Усиление производилось путем приварки уголков обратной кривизны. На рисунке 19 приведена схема данного усиления.

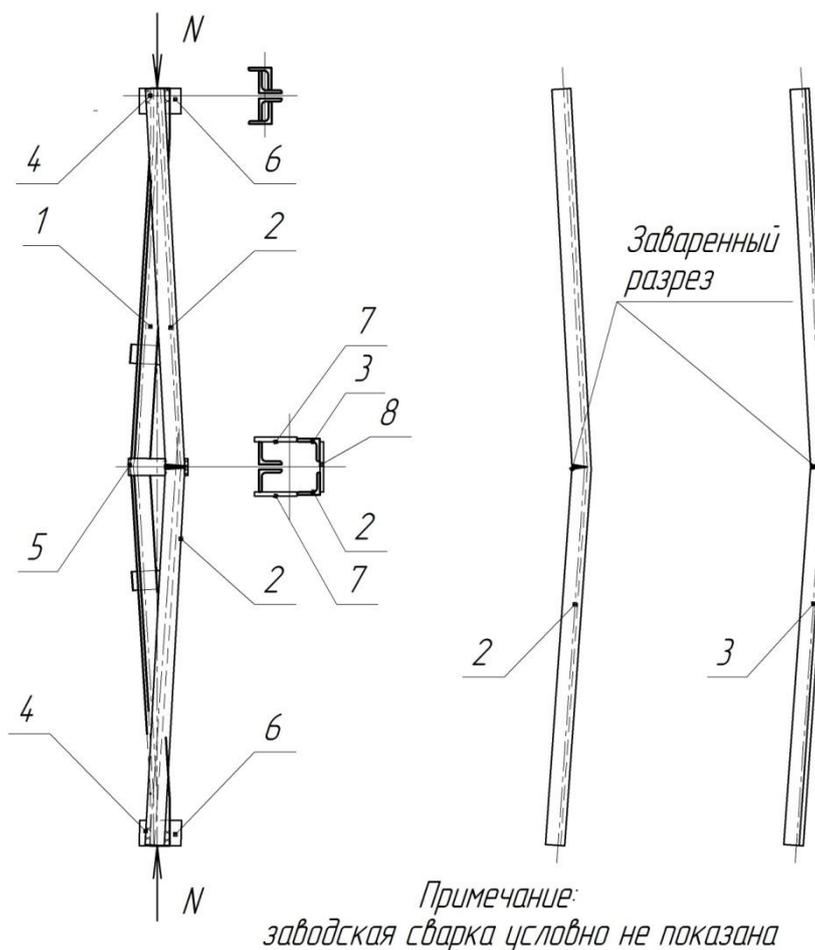


Рис. 19. Схема усиления деформированного стержня таврового сечения уголками обратной кривизны

Серия испытаний показала, что усиленный данным способом стержень в дальнейшем выдерживал нагрузку в 2 раза большую, чем прямой центрально сжатый стержень.

Каждое из данных усилений производится с применением сварки. Поэтому следует рассмотреть подробнее влияние сварочных деформаций на конструкцию.

1.8 Основные сведения о сварке

Сварка – процесс расплавления металла с помощью сварочной дуги и электрода и дальнейшее соединение межатомных связей свариваемых элементов.

Сварка широко применяется во многих отраслях благодаря своей простоте и эффективности.

На рисунке 20 представлен пример применения сварки при усилении стальных стропильных ферм каркаса промышленного здания.



Рисунок 20 – Производство сварочных работ при усилении стальной фермы

Процесс производства сварки металла с помощью электрической дуги представляет собой следующее: ток подводится к электроду, электрод подносится к месту сварки. При контакте с металлом появляется электрическая дуга, которая расплавляет электрод и свариваемый металл. В результате шов заполняется расплавленным металлом от проволоки электрода.

Согласно технике безопасности необходимо использовать защитную маску и перчатки. Сильный световой эффект может вызвать потерю зрения, а ис-

кры могут привести к ожогам. На рисунке 21 представлена защитная экипировка при выполнении сварочных работ.



Рисунок 21 – Защитная экипировка – сварочная маска и перчатки

Сварочная дуга появляется в результате действия длительного разряда между электродом и свариваемым изделием. Чаще всего дуга имеет форму коническую или сферическую. Появление дуги сопровождается сильной световой вспышкой, а температура дуги может достигать порядка 6000°C . На рисунке 22 представлена схема образования сварочной дуги.



Рисунок 22 – Схема образования сварочной дуги

Ниже представлена информация о различных длинах дуги, при которых производится сварка. Длиной дуги считается расстояние между торцом электрода до сварочной поверхности.

Различают следующие длины сварочных дуг:

- 1) короткие дуги – длина от 2 до 4 мм;
- 2) нормальные дуги – длина от 4 до 6 мм;
- 3) длинные дуги – длина более 6 мм.

Самая оптимальная длина дуги при сварке – короткая. При сварке длинной дугой, металл больше разбрызгивается, горение дуги имеет колебания, что приводит к неравномерности сварочного процесса. Это может повлиять на качество сварного шва.

Возможны следующие виды сварочных дуг:

- прямая дуга, когда контакт происходит между электродом и свариваемым элементом (рисунок 23а);

- косвенная дуга, когда контакт происходит между двумя электродами, а сам свариваемый элемент не включен в сварочную электрическую цепь (рисунок 23б);

- трехфазная дуга, которая контакт происходит между электродами, а также между каждым электродом и свариваемой поверхностью (рисунок 23в).

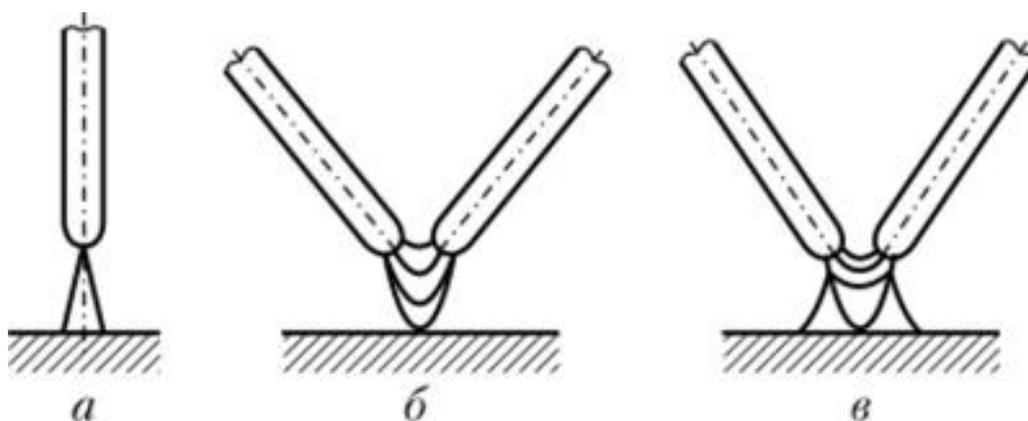


Рисунок 23 – Виды сварочных дуг

Чаще всего применяется прямая дуга.

Для сварочного процесса может использоваться и постоянный и переменный ток. Частота переменного тока – 50 Гц.

При сварке постоянным током выделяют сварку прямой и обратной полярности, это зависит от способа присоединения источников к изделию. Прямая полярность – на электроде минус, на металле – плюс. Обратная полярность – минус на свариваемом элементе, на электроде плюс.

Существует разделение сварочных электродов:

1. Плавящийся электрод. При этом в цепи значительная сила тока. При ручной сварке сила тока достигает 100-400А, при полуавтоматической - 350-600А, при автоматической 600-1000А.

2. Неплавящийся электрод. Такие электроды изготавливаются из вольфрама, также применяется угольный электрод.

Сварочное напряжение всегда небольшой величины и колеблется в районе $U = 30-60\text{В}$. В момент появления сварочной дуги напряжение несколько больше $U = 40-70\text{В}$.

В процессе сварки должен обеспечиваться стабильный режим.

Отклонения по предельному значению сварочного напряжения не должно превышать 5%.

«Тепловая энергия дуги не в полной мере идет на расплавление металла. Частично энергия уходит на теплоотдачу в атмосферу, на расплавление флюса или покрытия электрода» [2].

Тепловая энергия, идущая на нагрев и расплав металла за временную единицу, называется – эффективная тепловая мощность дуги.

Глубина проплавления, или провар шва, – глубина расплавления основного металла. Глубина расплавления основного металла подвергается изменению в связи с эффективностью тепловой мощностью дуги.

Глубина проплавления сварного шва характеризуется коэффициентами глубины проплавления по самому шву и на граница зона сплавления. При ручной сварке значение глубины проплавления шва незначительно, при полуавто-

матической сварке – больше, при автоматической сварке – наибольшее значение.

При воздействии тепловой энергии электрической дуги осуществляется расплав кромок металла, подверженного сварке, проволоки (электрода), флюса или покрытия электродом. В процессе этого возникает сварочная ванна из расплавленного материала, она покрыта шлаком и газами, которые выделяются при сварке.

В виде капель электродный металл переносится в разделку. За секунду осуществляется перенос от электрода в разделку шва примерно 25-50 капель.

Во время сварки в аргоне или в углекислом газе при наличии высоких плотностей тока металл электрода переходит в разделку шва мелким потоком капель. Весь этот процесс носит название струйного.

Перенос частиц металла осуществляется всегда от электрода (меньшего тела) к изделию (большему телу).

На процесс переноса не влияют направление электрического тока и положение свариваемого элемента (к примеру, в отношении проволоочной сварки).

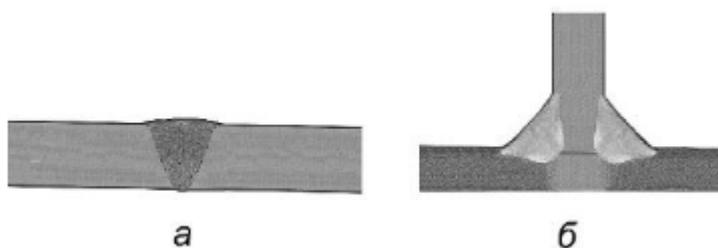
Скорость расплавления основного металла влияет на эффективность сварочного процесса, эта эффективность оценивается коэффициентом расплавления. Этот коэффициент численно приравнивается масса электродному металлу в граммах, расплавлено за один час и приходящийся на один ампер тока сварки. Коэффициенту расплавления и его толщина, полярность тока. У электродов, выполненных из стали, коэффициент расплавления разнится от 5 до 20 г/а-ч.

Наплавленный металл проволоки (электрода) во время сварки не полностью переходит в металл шва. Некоторой частью металл расходуется на разбрызгивании, окислении, угара. В связи с этим оценка эффективности заполнения швов производится с использованием коэффициента наплавки.

Коэффициенты наплавки меньше коэффициентов расплавки на величины потери электродных металлов в процессе сварке, составляющей 5-25%. Значение, что меньше, имеет отношение к сварке по флюсом, то, что больше, относится к ручной дуговой сварке.

«Необходимые геометрические параметры швов и механические свойства сварных швов должны обеспечиваться технологией сварки при наименьших внутреннем напряжении и деформации свариваемого металла» [2].

Все сварные можно разделить на угловые и стыковые. На рисунках 24, 25 представлены угловые и стыковые сварные швы.



а – стыковой шов; б – угловые швы

Рисунок 24 – Типы сварных швов



Рисунок 25 – Стыковой и угловой швы

Стыковые швы применяют в стыковых соединениях.

Угловые швы применяют в уголковых, тавровых и нахлесточных соединениях. В строительных металлоконструкциях в основном применяют угловые

швы (90%). На доле стыковых швов находится около 10%.» «По виду разделок кромки швов бывают без разделок кромок или с разделками кромки. Без разделок кромки свариваемы листы малой толщины. Элементы большой толщины можно сваривать без разделок только в случае больших сил тока.

Разделки кромки делают в листе с большой толщиной. Разделки кромки существуют V-образные, К-образные, Х-образные, У-образные. Всех перечисленных разделок кромки бывает с притуплением или с отсутствием притупления; с зазорами или без зазоров. Сварки швов с V-образной, К-образной, Х-образной и У-образной разделками, выполняются многопроходными сварками.

Скосы кромки осуществляются абразивными инструментами или кислородными резаками. В конструкции из высокопрочной стали после кислородных резок необходимы зачистки кромок абразивными инструментами.

В виду необходимости обеспечения равномерных зазоров неравномерность металла в зонах притупления после кислородных резок нужно устраивать зачистками абразивными инструментами.

Виды разделки кромок:

а – без разделки; б – V-образная разделка; в – К-образная разделка;
г – Х-образная разделка; д – У-образная разделка

Швы различаются по положению в пространстве:

- нижние положения;
- горизонтальные;
- вертикальные;
- потолочные;
- «в лодочку».

Наиболее простые и качественные по выполнению это нижние швы и швы «в лодочку», т.к. при их выполнении созданы наиболее благоприятное условие для получения шва хорошего качества. Сварка в нижних положениях и «в лодочку» выполняется удобно, легкое наблюдение за процессом сварки. В этих положениях расплавленные металлы переносятся в сварочные ванны в направлениях силы тяжести.

При выполнении вертикального и горизонтального шва требуется специальный навык. Выполнение сварки в вертикальных положениях металлы и сварочные ванны переносятся перпендикулярно направлению действия силы тяжести. Горизонтальный шов варить труднее, чем вертикальный, т.к. расплавленные металлы могут течь по кромкам нижнего листа.

По техникам выполнения процесс сварки потолочного шва наиболее труден, т.к. направление силы тяжести препятствует переносу капель расплавленных металлов электродов в сварочные ванны и расплавленные металлы стремятся стечь вниз.

По признаку протяженности швы подразделяют на:

- непрерывные;
- прерывистые.

Прерывистый шов применяется в том случае, когда соединения могут быть не плотными и несут незначительную статическую нагрузку. Расстояния между участком короткого шва не должно превышать 200 мм. Прерывистый шов бывает цепной и шахматный.

По отношению к действующему условию стыковой шов в стыковом соединении бывает прямой или косой.

Угловой шов в нахлесточном соединении бывает фланговый и лобовой. Фланговый шов расположен вдоль усилия, лобовой – поперек. Лобовой шов бывает прямой и косой.

В длинномерной конструкции типа балки и колонны различаются продольный и поперечный шов.

По количеству наплавляемого металла шов бывает нормальный, выпуклый или вогнутый. В нормальной хронике. В этих местах происходят концентрации напряжений, что может привести к преждевременным разрушениям швов.

Вогнутый шов следует выполнять с плавными переходами к основному металлу. Такой шов рекомендуют применять в конструкции, воспринимающей динамическую и вибрационную нагрузку, а также в конструкции, возводимой в

районе с расчетной температуре ниже -40°C и в конструкции из стали с временными сопротивлениями.

Придание угловому шву вогнутым профилем и плавным переходом к основным металлам осуществляется либо подбором режима сварки, либо соответствующими пространственными расположениями свариваемых частей конструкций, либо механизированными зачистками абразивными инструментами.

По числу проходов (слоев) сварки стыковой шов может быть однопроходный, двухпроходный и многопроходный, односторонний или двусторонний.

В тавровом соединении шов может быть односторонний и двусторонний, а также однопроходный, двухпроходный и многопроходный.

Каждый последующий валик многопроходных швов накладывается после тщательных очисток предыдущих валиков от шлака и брызг металла. При двусторонней сварке стыкового шва перед выполнением швов с обратной стороны нужно очистить корень этих швов до чистого бездефектного металла.

По восприятию действующей нагрузки шов бывает расчетный и конструктивный. Размер расчетного шва проверяется на прочность или подбирается на основе расчетов. Размер конструктивного шва проверяется на прочность или подбирается на основе расчетов. Из всего объема сварных швов на долю расчетного приходится около 30-35%. Остальное – конструктивный, на его долю приходится примерно 65-70% всех протяженности сварного шва.

Сварными соединениями называются неразъемные соединения деталей, выполненные сваркой.

Различаются:

- стыковое соединение – соединение двух элементов расположенные в одной плоскости. Стыковое соединение в основном применяется в конструкции из листового металла. В стыковом соединении неодинаковых толщин обеспечивается плавный переход от элементов большей толщины к элементам меньшей толщины. При разнице в толщине не превышающей 5 мм, переходы осуществляются за счет наклонов поверхностей швов. При больших разнице

толщины на более толстых элементах должны быть сделаны скосы с уклонами не более 1:5.

- угловое соединение – соединение двух элементов, расположенного под прямыми или иными углами друг к другу. Угловое соединение применяется при приварке элемента к кромке листа или профиля;

- тавровое соединение – соединение, в котором к поверхностям одних элементов приваривается торцом другой элемент. Такое соединение наиболее широко используется при изготовлении строительной металлической конструкции;

- нахлесточное соединение – соединение, в котором свариваемый элемент параллельно расположен накладывается друг на друга;

- торцевое или боковое соединение – соединение, в котором листы равной ширины соединяются и свариваются по смежным торцам.

- соединение с накладкой – соединение, в котором стык перекрывается накладкой. Это соединение требует дополнительного количества металла, поэтому применяется только в том случае, когда технологически нельзя выполнить стыковые швы.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

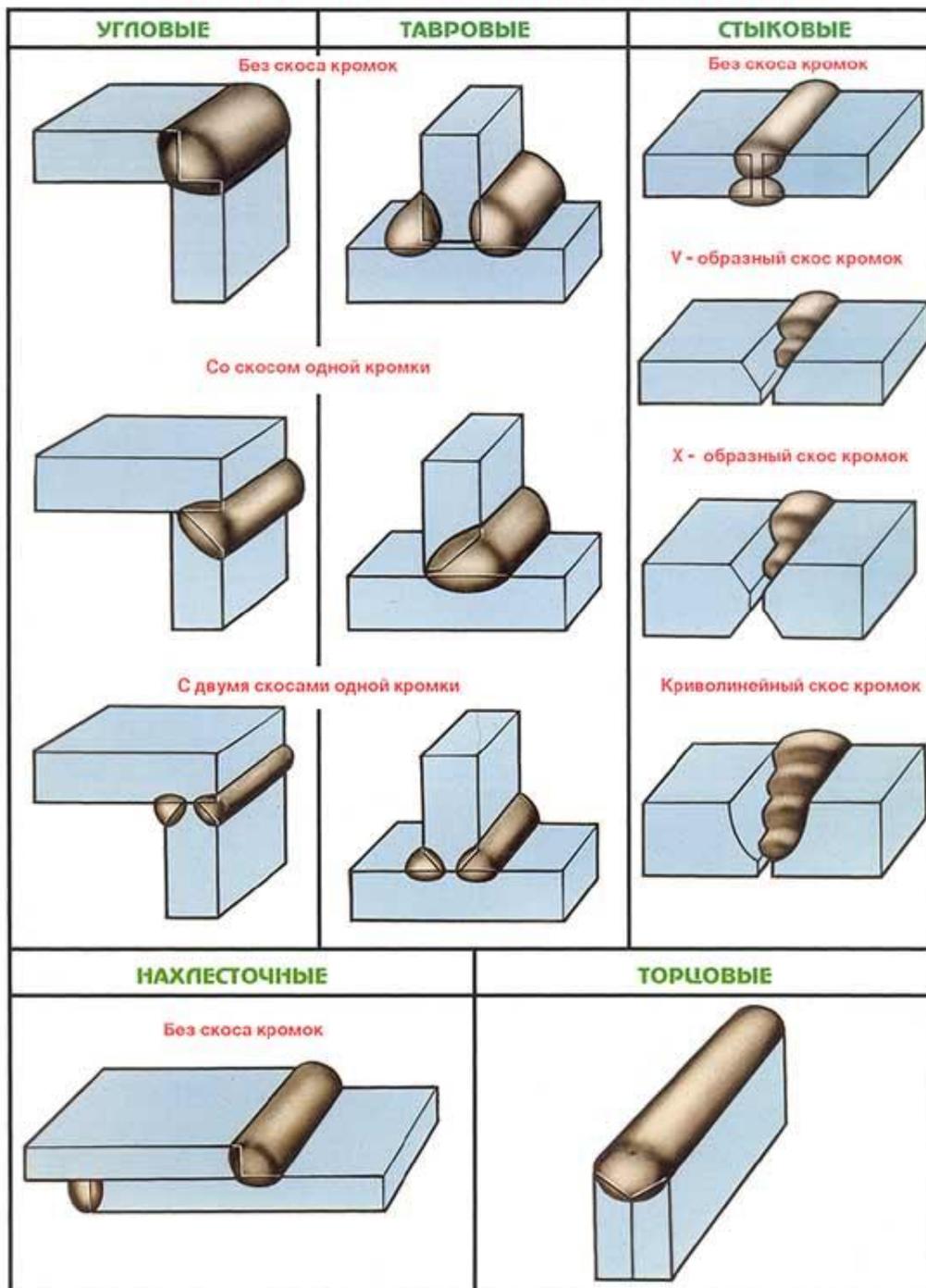


Рисунок 26 – Виды сварных соединений

Как правило, в соединениях с накладкой существует несколько видов сварного шва: стыковой, фланговый, лобовой. Такое соединение называется комбинированным. Действительная работа таких соединений зависит от распределений усилий между швов. Лобовой шов как наиболее жесткий воспринимает большое усилие. Фланговый как более податливый работает лучше.

В процессе выполнения такого соединения предпочтительно применяется фланговый шов и по возможности избегается применение лобового шва. На рисунке 27 представлено соединение листов с накладками.

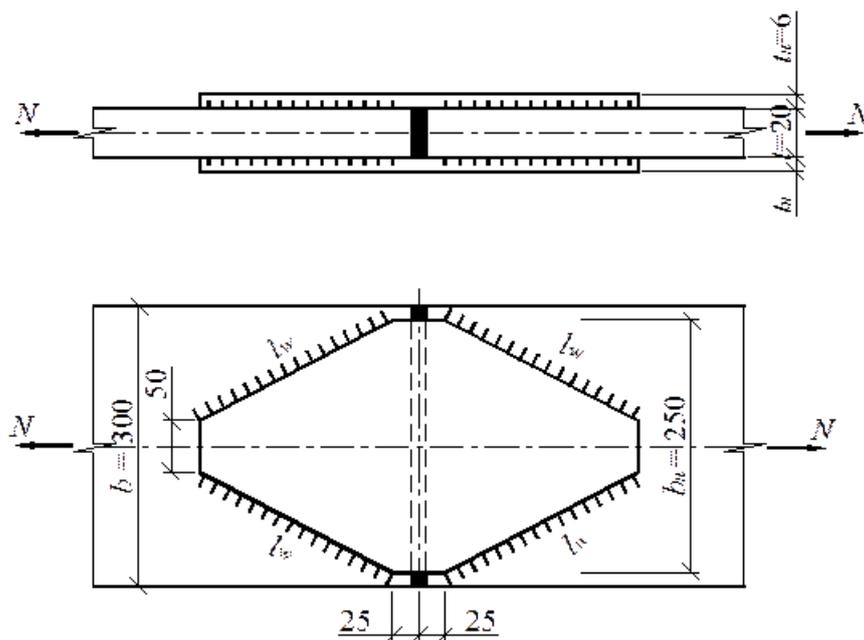


Рисунок 27 – Соединение листов с накладками

Неравномерный разогрев металла при сварке способствует неравномерным температурным деформациям. Целостность материала изделия препятствует свободной температурной деформации его отдельных частей. В процессе сварки образуются напряжения и пластическая деформация части металла соединения, а после охлаждения в изделии остаются сварочные напряжения и деформации. Напряжения и деформации, оставшиеся после сварки, называются термическими сварочными.

Остаточная сварочная деформация приводит к отклонению размеров и формы элемента от проектных данных. Если величины отклонений превышают допускаемые ГОСТ значения, то необходимо учитывать влияние сварочных деформаций, компенсировать их до сварки или править готовое изделие.

Напряжения, которые испытывает элемент при эксплуатации от внешнего усилия, накладываются на остаточные сварочные напряжения и суммируются с

ними. В результате ухудшается работоспособность и точность элемента и возможна преждевременная потеря прочности устойчивости.

В итоге можно отметить, что при усилении металлических стержней необходимо учитывать влияние сварочных деформаций, так как они могут негативно повлиять на конечный результат усиления. Необходимо разрабатывать мероприятия по снижению их влияния.

Чтобы уменьшить влияние остаточных сварочных деформаций и сварочных напряжений предусматриваются мероприятия по их снижению. Их можно разделить на:

- мероприятия, проводимые перед сваркой;
- мероприятия, проводимые во время сварки;
- мероприятия, проводимые после сварки.

К мероприятиям, проводимым перед сваркой можно отнести:

- компенсацию деформаций путем снижения катета углового шва, тем самым уменьшая тепловложения при сварке;
- избежание большого количества рядом расположенных и пересекающихся швов, так как остаточные напряжения будут суммироваться;
- избежание замкнутых швов при сварке, так как в контуре образуются выпучивания, сварочные напряжения суммируются;
- симметричное расположение сварных швов, для компенсации деформаций;
- минимальное использование накладок и косынок;
- обратный выгиб деталей;

К мероприятиям, проводимым во время сварки можно отнести:

- рациональный выбор вида и режима сварки, правильная последовательность наложения швов;
- производство сварки с жестким закреплением элементов;
- глубокое и равномерное проплавление швов;

К мероприятиям, проводимым после сварки можно отнести:

- холодная правка конструкции с помощью домкратов;

– горячая правка конструкции путем нагрева деформированных участков до пластического состояния. После остывания образуются деформации, обратные остаточным сварочным деформациям элемента.

1.9 Выводы по первой главе

1. В процессе эксплуатации промышленных зданий нередко происходят отказы несущих конструкций каркаса.

2. Наиболее часто случаются обрушения покрытия, связанные с потерей несущей способности наиболее напряжённых стержней, как растянутых, так и сжатых.

3. Обследования показывают, что сжатые стержни имеют дефекты: общие и местные деформации уголков стержней.

4. Наиболее часто имеют место общие выгибы стержней в плоскости фермы в направлении на обушки уголков. Такие стержни следует усилить.

5. Усиление наиболее часто производится увеличением сечения с применением сварки.

6. В известных источниках даётся разноречивая информация о схемах усиления дефектных стержней: предлагается усиление и короткими, и длинными стержневыми элементами при отсутствии методики расчёта

7. Обзор технической литературы свидетельствует об отсутствии чёткой информации о проведённых исследованиях.

8. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости проведения исследований эффективности различных схем усиления сжатых деформированных стержней.

Глава 2 Экспериментальное исследование

2.1 Методика проведения испытаний

Была поставлена цель исследования – получение экспериментальной информации о степени эффективности различных схем усиления сжатых деформированных стержней.

Для реализации цели, были поставлены следующие задачи:

1. Испытание стержней без усиления (эталонных).
2. Испытание стержней с усилением прямыми короткими стержнями.
3. Испытание стержней с усилением прямыми длинными стержнями.
4. Анализ полученной информации.

Стержни для проведения эксперимента были изготовлены на заводе ООО «Металлоконструкции». Для изготовления стержней были использованы равнополочные прокатные уголки сечением L40x4.

Для испытаний подготовлены 9 стержней длиной 1000 мм из двух уголков, составленных в тавр.

Уголки соединены прокладками в двух промежуточных сечениях; в опорах располагались пластины толщиной 20 мм с углублением под металлический шарик для возможности шарнирного опирания стержней (рисунок 28).

В качестве элементов усиления были подготовлены уголки длинами $L=1000$ мм и $L = 300$ мм. Такие длины были выбраны для того, чтобы произвести усиление двумя различными способами:

- 1) по всей длине стержня;
- 2) по длине выгиба деформированного стержня.

Изготовление экспериментальных стержней производилось согласно проектным чертежам (рис. 28) и спецификации (табл.1)

Согласно сертификату металла, полученного на заводе-изготовителе марка стали всех элементов – Ст3сп что (С245) согласно ГОСТ 14637-89. На рисунке 29 представлены заготовки для изготовления экспериментальных стержней.

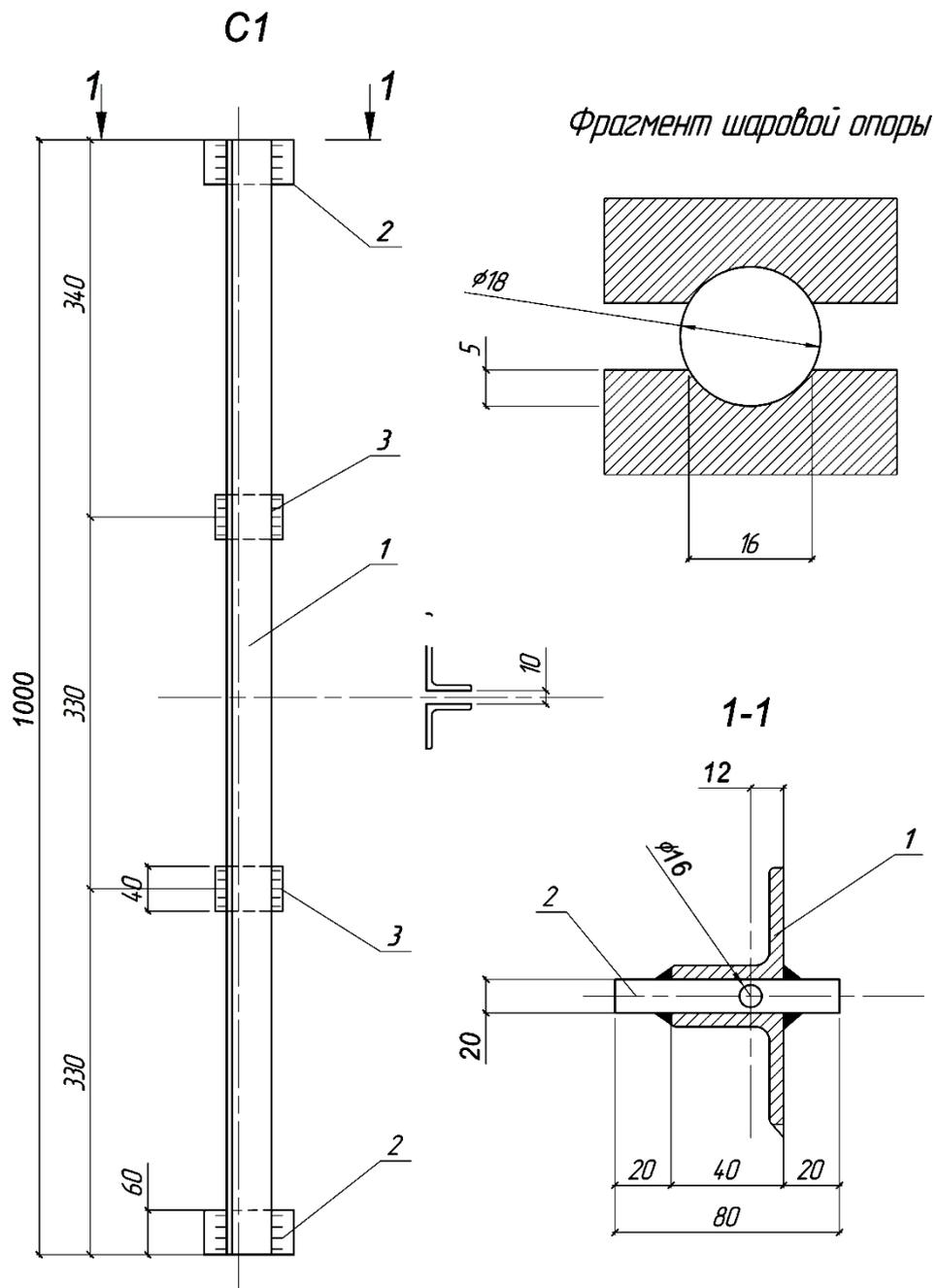


Рисунок 28 – Чертежи для изготовления экспериментальных стержней

Таблица 1 – Спецификация металла

Отправочная марка	№ поз	Кол-во		Сечение, мм	Длина, мм	Масса, кг			Примеч.
		т	н			шт.	всех	марки	
С1	1	2	-	L40x4	1000	2,5	5,0	8,0	-
	2	2	-	- 60x20	80	0,8	2,0	-	Св.
	3	2	-	- 40x10	80	0,3	1,0	-	-
	На свар. швы, 1%						1,0	-	-
С2	4	1	-	L40x4	1000	2,5	3,0	3,0	-
С3	5	1	-	L40x4	500	1,3	2,0	2,0	-

Таблица 1 – Таблица отправочных марок

Отправочная марка	Кол-во		Масса, кг		Примеч.
	т	н	шт.	всех	
С1	9	-	8,0	72,0	-
С2	6	-	3,0	18,0	-
С3	6	-	2,0	12,0	-

На рисунке 29 представлены заготовки для изготовления экспериментальных стержней.



Рисунок 29 – Заготовки для изготовления экспериментальных стержней

Изготовление стержней производилось следующим образом:

- 1) в пластинах 60x20 предварительно сверлились отверстия под шаровую опору;
- 2) производилась сварка уголков 2L40x4 с пластинами размером 60x20;
- 3) производилась сварка соединительных прокладок 40x10 с полученными стержнями из спаренных уголков;
- 4) с помощью специального приспособления часть стержней деформировалась так, чтобы общий выгиб составлял примерно 25 мм (для воспроизведения аварийного состояния стержня).

Все стержни были разделены на 3 серии по 3 шт. в каждой серии (таблица 3):

- 1) эталонные стержни (не деформированные);
- 2) деформированные стержни, усиленные прямыми длинными уголками;
- 3) деформированные стержни, усиленные прямыми короткими уголками.

Таблица 3 – Серии экспериментальных стержней

Серия стержней	Эскиз эталонного стержня	Кол-во стержней в серии	Вид начальной деформации	Наличие усиления	Элементы усиления
1		3	Без деформаций	Без усиления	Нет
2		3	Общий выгиб на обухи $f=25\text{мм}$	С усилением	2 L40x4 прямые, короткие
		3			2 L40x4 прямые, длинные

Все стержни поделены на три серии – серия 1 (3 стержня), серии 2к и 2д (6 стержней). Стержни серии 1 – прямые (эталонные); стержни серии 2к и 2д имели общий выгиб в плоскости соединительных прокладок в направлении на обушки уголков со стрелкой выгиба 25 мм.

Стержни серии 2к усиливались короткими уголками – 2 L40x4, длиной 600 мм; стержни серии 2д усиливались длинными, длиной 1000 мм.

Испытания проводились на гидравлическом прессе П-200. Опоры прессы шарнирные (рисунок 28), предварительно отцентрированные.

Испытания стержней 1-й серии (рисунок 30) проводились в следующем порядке:

1. Установка стержня между опорами.
2. Нагружение ступенями по 200 кг до потери устойчивости.
3. Фиксирование критической нагрузки.

Исследования, проведённые накануне, дали результаты, свидетельствующие об отсутствии влияния начальных напряжений (от нагрузки усиления) на несущую способность усиленных стержней.

Это позволило проводить испытания стержней серий 2к (рисунок 31) и 2д (рис. 32) следующим образом: деформированный стержень с прикреплёнными на сварке элементами усиления устанавливался между опорами; производилось нагружение до потери устойчивости; определялась критическая нагрузка.



Рисунок 30 – Испытание эталонного стержня



Рисунок 31 – Испытание стержня, усиленного короткими уголками



Рисунок 32 – Испытание стержня, усиленного длинными уголками

Далее был произведён анализ результатов для последующей разработки методик определения несущей способности усиленных стержней.

2.2 Техника безопасности при выполнении сварочных работ

Согласно ГОСТ 12.3.003-86 «Работы электросварочные. Техника безопасности» при выполнении сварочных работ необходимо придерживаться требований, изложенных ниже.

Организация процесса сварки должна максимально быть автоматизирована. Должны быть локализованы вредные и опасные производственные факторы.

Оборудование для сварочных работ должно соответствовать ГОСТ 12.2.003-74 и ГОСТ 12.2.049-80.

Не допускается проведение сварочных работ при отсутствии вентиляции.

Помещения, в которых производится сварка, должны отвечать требованиям действующих санитарных норм, строительных норм и правил.

Допуск к сварочным работам должен осуществляться после того, как была изучена проектная документация.

Подключение и отключение сварочного оборудования должно происходить в присутствии электротехнического персонала.

К выполнению сварочных работ допускаются лица, которые прошли инструктаж по технике безопасности и проверку знаний, а так же имеют соответствующие удостоверения.

Лицо, выполняющее сварочные работы должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты. Необходима периодическая обработка средств индивидуальной защиты.

2.3 Техника безопасности при работе с гидравлическим прессом

При выполнении работ с гидравлическим прессом необходимо соблюдать требования по технике безопасности представленные ниже.

Необходимо использовать ограничители, для того чтобы избежать непреднамеренного падения. Ограничитель должен все время функционировать и иметь автоматическую работу.

До начала работ необходимо надеть спецодежду и проконтролировать, чтобы не было свисающих концов одежды, защитные очки должны быть без повреждений.

Необходимо убрать мешающие предметы, проходы должны быть свободны. Удобно и безопасно расположить необходимые предметы для работы. Освещение должно быть достаточным.

Убедиться в исправности пресса, манометров, кнопки «СТОП»

Во время работы

Во время работы на прессе необходимо быть предельно внимательным, не допускать посторонних лиц к прессу.

Смена деталей должна производиться только при верхнем крайнем положении штока.

При застревании детали необходимо немедленно остановить работу пресса и обратиться к мастеру.

Обязательно отключение пресса в случае ухода с рабочего места, перерыве в подаче электроэнергии, в случае неисправности, в случае нарушения технологического процесса.

По окончании работ оборудование должно быть обесточено, рабочее место должно быть приведено в порядок, пресс должен быть очищен от загрязнений.

2.4 Анализ результатов испытаний

Проведённые испытания подтвердили известные положения: все стержни теряли несущую способность с элементами упругопластических деформаций.

На рис. 33 представлена фотография потерявшего устойчивость стержня серии 1; на рис. 34 – стержня серии 2к; на рис. 35 – стержня серии 2д.

Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний

Серия	Тип усиления	Критические силы, кН
Серия 1	нет	105, 93, 110
Серия 2к	2 L 40x4 – короткие	65, 63, 70
Серия 2д	2 L 40x4 – длинные	143, 175, 140

Критические силы стержней по сериям имеют довольно небольшой разброс:

- центрально сжатые стержни серии 1 – 105, 93, 110 кН;
- усиленные короткими элементами стержни серии 2к – 65, 63, 70 кН;
- усиленные длинными элементами стержни серии 2д – 143, 175, 140 кН.

В случае применения длинных стержней усиления достигается порядка 40% увеличение несущей способности по сравнению с эталонными.

Несущая способность образцов, усиленных короткими стержнями, на 50% меньше несущей способности эталонных образцов.

Характер потери несущей способности образцов, усиленных короткими и длинными стержнями, позволил найти причину низкой эффективности усиления короткими элементами: неудовлетворительная работа на внецентренное сжатие неусиленных приопорных частей стержней.



Рисунок 33 – Потерявший устойчивость стержень серии 1



Рисунок 34 – Потерявший устойчивость стержень серии 2к



Рисунок 35 – Потерявший устойчивость стержень серии 2д

На рисунке 36 хорошо видна потеря местной устойчивости в приопорном участке стержня, усиленного короткими элементами.



Рисунок 36 – Местная потеря устойчивости в приопорном участке стержня при усилении короткими уголками

В целом, проведённые экспериментальные исследования дали возможность понять работу сжатых, усиливаемых разными элементами стержней и предложить методики расчёта, позволяющие определять с достаточной надёжностью их несущую способность.

2.5 Выводы по второй главе

По результатам проведённых экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Критические силы образцов имеют небольшой разброс, что подтверждает достоверность результатов.

2. Усиление стержней, имеющих начальный выгиб в плоскости фермы на обушок уголков неэффективно производить короткими стержнями.

3. Усиление таких стержней следует производить прямыми уголками усиления длиной, равной длине усиливаемых элементов, или уголками длиной, равной длине усиливаемых элементов, имеющими обратный выгиб.

Глава 3 Теоретическое обоснование эксперимента

3.1 Расчёт несущей способности эталонного стержня

Расчет эталонного стержня производился согласно СП 16.13330.2017 [26] как для центрально сжатого. Опоры реально – шаровые, поэтому принята расчетная схема с шарнирным закреплением концов. Расчетная схема стержня представлена на рисунке 34.

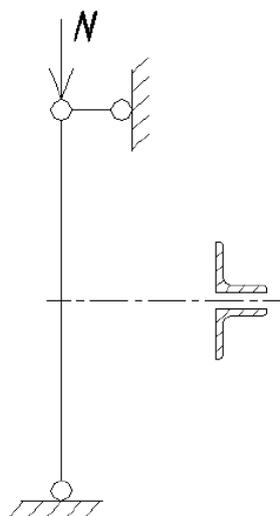


Рисунок 34 – Расчетная схема эталонного стержня

Геометрические характеристики эталонного стержня сечением 2L40x4, составленных в тавр:

- площадь сечения: $A=2 \cdot 3,08=6,16 \text{ см}^2$;
- радиус инерции относительно оси x: $i_x=1,22 \text{ см}$;
- радиус инерции относительно оси y: $i_y=1,8 \text{ см}$;
- длина стержня: $L=100 \text{ см}$;

Металл сертифицирован. Предел текучести равен $\sigma_T = 31,5 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$;

Результаты расчета представлены ниже:

Гибкость в плоскости перпендикулярной оси x определяется по формуле:

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{100}{1,22} = 82, \quad (3)$$

где l_x – длина стержня, i_x – радиус инерции,

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{100}{1,22} = 82,$$

Гибкость в плоскости перпендикулярной оси y :

$$\lambda_x = \frac{100}{1,8} = 55,6;$$

Приведенная гибкость вычисляется по формуле:

$$\lambda_x^- = \lambda_{max} \frac{\overline{\sigma_T}}{E}, \quad (4)$$

где λ_{max} – наибольшая гибкость, σ_m – предел текучести, E – модуль упругости,

$$\lambda_x^- = \lambda_{max} \frac{\overline{\sigma_T}}{E} = 82 \frac{31,5}{2,1 \cdot 10^4} = 3,17$$

Коэффициент продольного изгиба определяется согласно табл. Ж.1 для типа кривой устойчивости «с» $\varphi = 0,531$

Несущая способность стержня определяется по формуле:

$$N = \varphi \cdot A \cdot \sigma_T, \quad (5)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба, A – площадь сечения, σ_T – предел текучести,

$$N = 0,531 \cdot 6,16 \cdot 3,1 = 103 \text{ кН.}$$

Несущая способность эталонных стержней, полученная путем испытаний – $N_1 = 105$ кН; $N_2 = 93$ кН; $N_3 = 110$ кН. Расхождение с теоретическим расчетом незначительное, что позволяет судить о достоверности полученных данных.

3.2 Расчет несущей способности деформированного стержня

Стрелка выгиба деформированного стержня принималась равной $f = 25$ мм. Расчетная схема данного стержня представлена на рисунке 35. Сечение стержня представлено на рисунке 36.

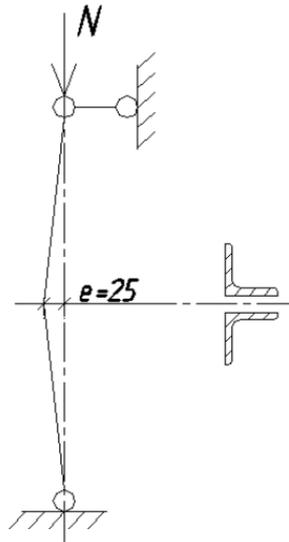


Рисунок 35 – Расчетная схема деформированного стержня

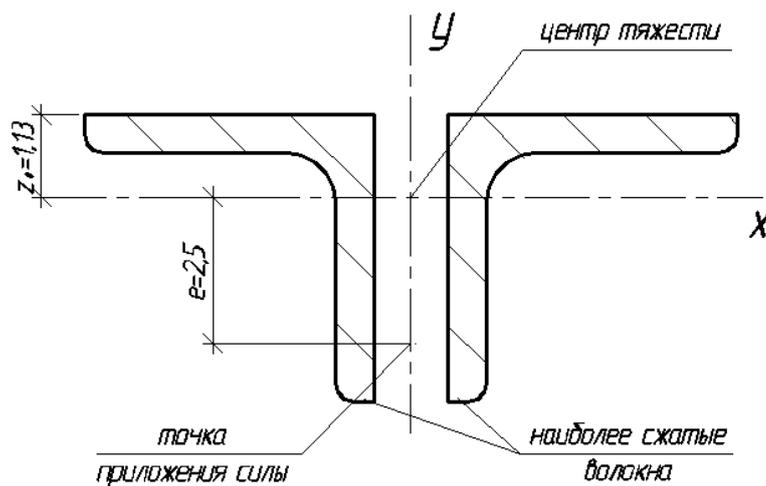


Рисунок 36 – Сечение стержней

Несущая способность внецентренно-сжатого стержня определяется по формуле:

$$N = \varphi_e \cdot A \cdot \sigma_T, \quad (6)$$

где φ_e – коэффициент продольного изгиба, A – площадь сечения, σ_T – предел текучести

Момент сопротивления наиболее сжатого волокна относительно оси x:

$$W_x = \frac{2 \cdot 4,58}{2,87} = 3,19 \text{ см}^2$$

Относительный эксцентриситет вычисляется по формуле:

$$m_{ef} = \frac{e \cdot A}{W_x}, \quad (7)$$

где e – эксцентриситет, A – площадь сечения, W_x – момент сопротивления,

$$m_{ef} = \frac{2,5 \cdot 2 \cdot 3,08}{3,19} = 4,82$$

Коэффициент φ_e определяем по таблице 74, как функцию λ^- и m_{ef}

Для данного типа сечения коэффициент η определяется по формуле:

$$\eta = 1,5 - 0,1 \cdot m - 0,02 \cdot 5 - m \lambda^-, \quad (8)$$

где m – относительный эксцентриситет, λ^- – приведенная гибкость,

$$\eta = 1,5 - 0,1 \cdot 4,82 - 0,02 \cdot 5 - 4,82 \cdot 2,77 = 1,008$$

Относительный эксцентриситет равен:

$$m_{ef} = \eta \cdot m, \quad (9)$$

где η – коэффициент, m – относительный эксцентриситет,

$$m_{ef} = 1,008 \cdot 4,82 = 4,86$$

Несущая способность (формула 6):

$$N = 0,2 \cdot 6,16 \cdot 31,5 = 38,8 \text{ кН}$$

Экспериментальные значения не были получены, но сходимость результатов испытаний эталонного стержня позволяет судить о достоверности результатов расчёта.

3.3 Расчет несущей способности усиленных стержней

Расчетная схема стержня, усиленного короткими прямыми стержнями представлена на рисунке 37.

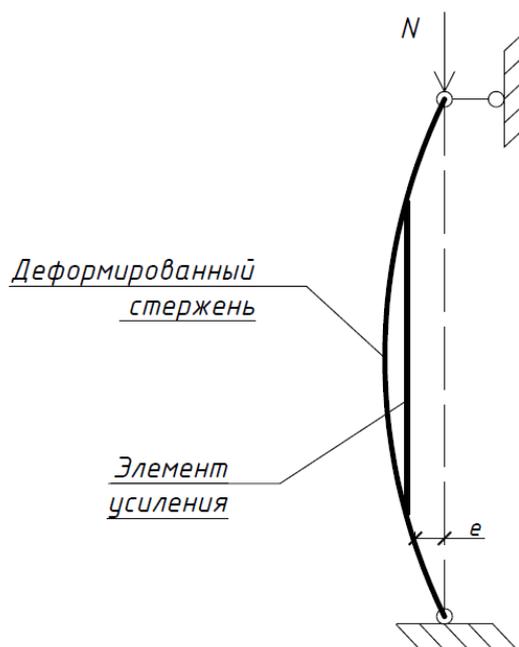


Рисунок 37 – Расчетная схема стержня, усиленного короткими прямыми стержнями

Несущая способность внецентренно-сжатого стержня определяется по формуле:

$$[N] = \varphi_e^0 \cdot A_0 \cdot \sigma_T, \quad (10)$$

где φ_e^0 – коэффициент продольного изгиба, определенный для сечения неусиленной части стержня с учетом действующего эксцентриситета $e = 1,0$ см; A_0 – площадь сечения основного стержня; σ_T – предел текучести стали;

$$W_x^{\text{сжк}} = 3,19 \text{ см}^3;$$

$$\varphi_e^0 = f(\lambda'_0, \sigma_T) = 0,265$$

Согласно формулам в разделе 3.2:

$$m_{ef} = \frac{1,0 \cdot 2 \cdot 3,08}{3,19} = 1,93$$

$$\eta = 1,5 - 0,1 \cdot 1,93 - 0,02 \cdot 5 - 1,93 \cdot 2,77 = 1,14$$

$$m_{ef} = 1,14 \cdot 1,93 = 2,2 \quad \varphi = 0,32$$

$$[N] = 0,32 \cdot 6,16 \cdot 31,5 = 62,1 \text{ кН}$$

Расчетная схема и сечение стержня, усиленного короткими прямыми стержнями, представлена на рисунках 38,39.

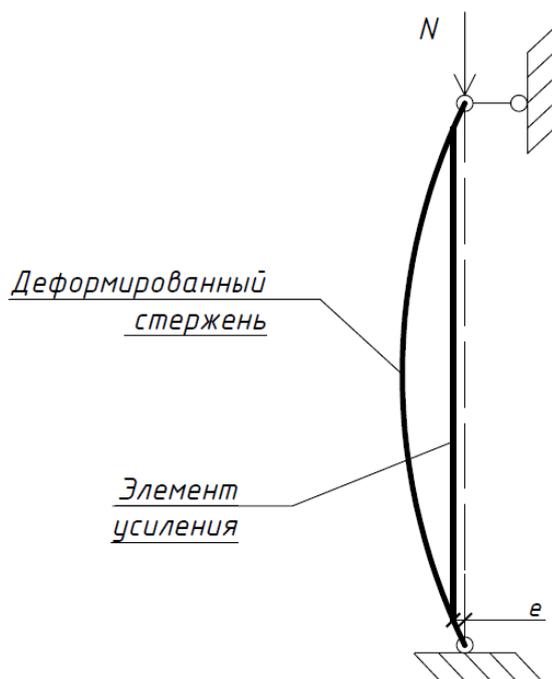


Рисунок 38 – Расчетная схема стержня, усиленного уголками длиной, равной длине усиливаемого элемента

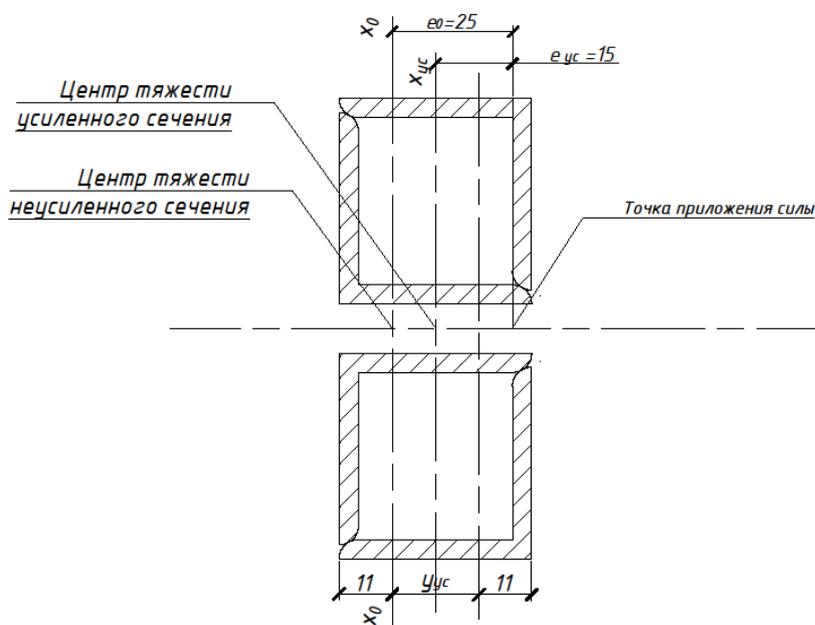


Рисунок 39 – Сечение усиленного стержня

Расчет несущей способности производился по формуле:

$$[N] = \varphi_e^{ус} \cdot A_{ус} \cdot \sigma_T, \quad (11)$$

где $\varphi_e^{ус}$ – коэффициент продольного изгиба, определенный для усиленного стержня с учетом эксцентриситета $e_{ус} = 1,5$ см.

$A_{yc} = 4A_o$ – площадь сечения усиленного стержня, где A_o – площадь сечения одного уголка.

σ_T – предел текучести стали.

$$\varphi_e^{yc} = f(m_{ef}, \sigma_T),$$

Момент сопротивления:

$$W_x^c = I_x^{yc} / y_c, \quad (12)$$

где I_x^{yc} – момент инерции относительно оси x , y_c – наиболее удаленное расстояние,

Момент инерции усиленного сечения:

$$I_x^{yc} = 4(I_x^1 + A y_{yc}^2), \quad (13)$$

где I_x^1 – момент инерции 1, A – площадь сечения,

$$I_x^{yc} = 4 \cdot 4,58 + 3,08 \cdot 0,9^2 = 28,3 \text{ см}^4$$

Радиус инерции усиленного стержня:

$$i_x^{yc} = \sqrt{\frac{I_x^{yc}}{4A_o}}, \quad (14)$$

где I_x^{yc} – момент инерции усиленного стержня, A_o – площадь усиленного стержня

$$i_x^{yc} = \sqrt{\frac{I_x^{yc}}{4A_o}} = \sqrt{\frac{28,3}{4 \cdot 3,08}} = 1,52 \text{ см}$$

Согласно формулам 3,7,8,9:

$$\lambda_x^{yc} = \frac{100}{1,52} \sqrt{\frac{31,5}{2,1 \cdot 10^4}} = 2,57$$

$$W_x^c = \frac{28,3}{2} = 14,15 \text{ см}^3$$

$$m = \frac{1,5 \cdot 4 \cdot 0,8}{14,15} = 1,3$$

$$\eta = 1,25 - 0,05 \cdot 1,3 - 0,01 \cdot 5 - 1,3 \cdot 2,57 = 1,089$$

$$m_{ef} = 1,089 \cdot 1,3 = 1,42$$

$$\varphi = 0,414$$

$$[N] = 0,414 \cdot 4 \cdot 3,08 \cdot 31,5 = 160,7 \text{ кН}$$

Ниже приведена таблица сравнения экспериментальных и теоретических результатов (таблица 5).

Таблица 5

Серия	Тип усиления	Несущая способность, кН	
		Экспериментальная	Теоретическая
Серия 1	нет	105, 93, 110	103
Кривой, неусиленный	нет	-	38,8
Серия 2к	2 L 40x4 – короткие	65, 63, 70	62,1
Серия 2д	2 L 40x4 - длинные ($l = 1000 \text{ мм}$)	143, 175, 140	160,7

3.4 Выводы по третьей главе

1. Критические силы всех стержневых образцов близки к теоретически полученным величинам.

2. Предложенные методики расчёта несущей способности усиливаемых стержней позволяют получать вполне достоверные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты проведённого исследования позволили дать новые трактовки напряжённого состояния усиливаемых стержней с начальными выгибами в плоскости фермы и предложить методики расчёта их несущей способности при двух различных схемах усиления: короткими и длинными стержнями.

2. Усиление стержней, имеющих начальный выгиб в плоскости фермы на обушок уголков, неэффективно производить короткими стержнями.

3. Усиление таких стержней следует производить:

– прямыми уголками усиления длиной, равной длине усиливаемых элементов, или

– уголками длиной, равной длине усиливаемых элементов, имеющими обратный выгиб (исследования И.А. Батыревой).

4. Предложенные методики расчёта несущей способности усиливаемых стержней позволяют получать вполне достоверные результаты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций / Аугустин Я., Шледзевский Е. – М. : Стройиздат, 1978. – 135 с.
2. Металлические конструкции. В 3т. Т.3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений: Справочник проектировщика. / Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИ проектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). – М. : изд-во АСВ, 1999. – 527 с.
3. Бельский, М.Р. Усиление стальных конструкций / Бельский М.Р., Лебедев А.И. – Киев : “Будівельник”, 1981. – 120 с.
4. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения Текст. / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. — М. : Стройиздат, 1968. –206 с.
5. Валь, В.Н. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции / В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров. – М. : Стройиздат, 1987. – 220 с.
6. Десятов, Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм. Автореф. дисс. канд. техн. Наук / Десятов Б.И. – М. : МИСИ, 1968.
7. Дмитриев, Ф.Д. Крушение инженерных сооружений / Дмитриев Ф.Д. – М. : Стройиздат, 1953. – 140 с.
8. Иванов, Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление восстановление и ремонт / Иванов Ю.В. – М. : АСВ, 2012. – 312 с.
9. Игнатьева, В.С. Метод "фиктивных температур" как основа исследований в области напряженно деформируемого состояния сварных соединений. Металлические конструкции в строительстве. - Труды / Игнатьева В.С. – МИСИ им. Куйбышева, 1979, №152, с. 71-88.
10. Металлические конструкции : учебник / Ю. И. Кудишин [и др.] ; под ред. Ю. И. Кудишина. - 11-е изд., стер. ; Гриф МО. - М. : Академия, 2008. - 681 с. : ил. - (Высш. проф. образование). - Библиогр.:

11. Колесников, В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой / В. М. Колесников. - Л., 1967. - 24 с.

12. Лащенко, М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений/ М.Н. Лащенко. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1969. -184с.

13. Горев, В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Конструкции зданий: Учеб. для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И.Белый и др.; Под редакцией В.В. Горева. – 2–е изд., испр. – М. : Высш. Шк., 2002. – 528с.

14. Металлические конструкции. Справочник проектировщика в 3 томах / Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П.Мельникова) — М. : изд-во АСВ, 1998-99. – 528 с.

15. Мизюмский, И.А. Аварии и крушения стальных конструкций и исследование причин разрушения сварных стыков уголков. Кандидатская диссертация/ И.А. Мизюмский —ЛИСИ, 1959.

16. Мандриков, А.П. Примеры расчета металлических конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 432 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/9466> (дата обращения: 12.09.18)

17. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций / Укрании-проектстальконструкция.-М.: Стройиздат, 1989. – 159 с.

18. Ребров, И.С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой/ И.С. Ребров – Л., «Стройиздат», 1976.

19. Ребров, И.С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет Текст. / И.С. Ребров. – Л.: Стройиздат, 1988. — 288 с.

20. Родионов, И.К. К вопросу об оптимальной технологии усиления сжатых стержней уголкового ферм покрытия. В межвуз. сб. науч. трудов «Наука, техника и образование Тольятти и Волжского региона», вып. 4, ч.2. Политехнический институт, 2001. С.464–465.

21. Родионов, И.К. О некоторых вопросах усиления методом увеличения сечения сжатых стержней стальных уголковых ферм. В межвуз. сб. науч. трудов «Наука, техника и образование Тольятти и Волжского региона», ч.2. Политехнический институт, 2000. с. 165–169.
22. Родионов, И.К. Сварочные деформации, метод «фиктивных температур» и усиление сжатых стержней стальных ферм покрытия. Труды междунар. научно-технич. конфер. (Резниковские чтения). Теплофиз. и технолог. аспекты повыш. эффектив. машиностр. производ. ТГУ, Тольятти, 2015, с. 118-123.
23. Родионов, И.К. Усиление сжатых стержней стальных ферм производственных зданий. «Сварочное производство» №4, 2009, с. 25-29.
24. Руководство по усилению элементов металлоконструкций с применением сварки. ЦНИИпроектстальконструкция. М. : 1979, 15 с.
25. Сахновский, М.М. Уроки аварий стальных конструкций / Сахновский М.М., Титов А.М. —Киев: Будівельник, 1969, —200 с.
26. СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*" (с Поправкой, с Изменением N 1) – [эл. р.] Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084089> (дата обращения: 10.05.2018)
27. Стрелецкий, Н.С. Работа сжатых стоек / Стрелецкий Н.С. — Госстройиздат, 1959.
28. Шкинев, А.Н. Аварии в строительстве. - 4-е изд., перераб. и доп. / Шкинев А.Н. - М. : Стройиздат, 1984.
29. Ясинский, Ф.С. Избранные работы по устойчивости сжатых стержней / Ясинский Ф.С. - Л. : Гостехиздат, 1952. - 428 с
30. Ибрагимов, А.М. Сварка строительных металлических конструкций: Учебное пособие / А.М. Ибрагимов, В.С. Парлашкевич - М. : Издательство АСВ, 2015.
31. Al-Sulaimani, G.J., M. Kaleemullah, I.A. Basunbul, I.A. Rasheeduzzafar, 1990. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. Struct. J., 87(2): 220-231.

32. Andrade, C., C. Alonso and F.J. Molina, 1993. Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part I- experimental test. *Mater. Struct.*, 26: 453-464.
33. Bazant, Z.P., 1979. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-theory. *J. Struct. Div.*, 105(6): 1137-1153.
34. Bhargava, K., A.K. Ghosh, Y. Mori and S. Ramanujam, 2006. Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures. *Eng. Struct.*, 28: 1093-1109.
35. Cabrera, J.G. and P. Ghoddoussi, 1992. The effect of reinforcement corrosion on the strength of the steel-concrete bond. *Proceedings of an International Conference on Bond in Concrete*. CEB, Riga, Latvia.