

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование вопроса влияния начальной нагрузки на работу
центрально сжатых стержней, усиливаемых методом увеличения сечения

Студент

А.С. Сучков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд.техн.наук, доцент И.К. Родионов

руководитель

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

Тольятти 2021

Содержание

Введение.....	3
1 Состояние вопроса усиления стальных ферм покрытия промышленных зданий	7
1.1 Здания и сооружения из металлических конструкций.....	7
1.2 Дефекты и повреждения.....	7
1.3 Случаи обрушения стальных ферм	13
1.4 Усиление стальных ферм	18
1.5 Основные сведения о сварке	29
1.6 Методики определения состояния стержней ферм, подвергаемых усилению методом увеличения сечения.....	43
2 Экспериментальное исследование работы сжатых стержней, усиливаемых с применением сварки	52
2.1 Методика проведения испытаний	52
2.2 Техника безопасности при выполнении сварочных работ	60
2.3 Техника безопасности при работе с гидравлическим прессом	61
2.4 Анализ результатов испытаний	61
3 Теоретическое обоснование эксперимента	65
3.1 Расчёт несущей способности эталонного стержня.....	65
3.2 Расчет несущей способности усиленных стержней	66
Заключение	70
Список используемой литературы	72

Введение

С развитием экономики в России появляется потребность в модернизации и реконструкции промышленных зданий предприятий. Необходимо замена старого оборудования на новое, введения передовых технологий, повышение несущей способности конструкций и многое другое. Это позволяет производить больше продукции без увеличения площади здания, что дает значительную экономию средств по сравнению с новым строительством.

Здания в абсолютном большинстве с каркасом, выполненным из стали. Конструкции стальных колонн, ферм, балок, рам требуют большего внимания, так как для увеличения несущей способности необходимо усиливать именно их.

Реконструкция, как правило, требует увеличения несущей способности элементов каркаса, в том числе стропильных ферм покрытия. Наиболее часто это фермы со стержнями из парных прокатных уголков. Появляется необходимость в увеличении несущей способности ферм. В большинстве случаев не нужно выполнять усиление всех элементов фермы. Достаточного эффекта часто можно достичь усилением отдельных стержней фермы, сжатых и растянутых.

Методы усиления различны, в случае сжатия часто применяется метод увеличения сечения путем присоединения на сварке усиливающих стержневых элементов: уголков, пластин и другие. Метод достаточно эффективный, технологически относительно несложный. Применение его особенно рационально в случае необходимости усиления сжатых стержней из плоскости фермы.

Усиление элементов ферм чаще приходится выполнять на высоте более 5 м, что не позволяет использовать автоматическую сварку. Для этого используют ручную дуговую сварку, что позволяет спокойно выполнять сварочные работы при усилении ферм. Также есть возможность выполнять

сварку в трудно доступных местах.

Актуальность темы исследования:

Значительная часть промышленных зданий со стальным каркасом требует реконструкции. В процессе реконструкции появляется необходимость в увеличении несущей способности ферм, что часто достигается усилением стержней, в том числе и методом увеличения сечения путем присоединения на сварке усиливающих элементов.

Сварка под нагрузкой – это серьёзный вопрос. Известны случаи потери устойчивости при усилении под нагрузкой экспериментальных стержней. Разноречива информация о влиянии нагрузки усиления на несущую способность усиленных сжатых стержней стальных ферм.

Объект исследования – стальная ферма со стержнями из парных уголков.

Предмет исследования – центрально сжатый стержень.

Цель магистерской диссертации – получить информацию о влиянии нагрузки, которая действует на элемент в момент усиления, на несущую способность усиленных стержней.

Задачи исследования:

- 1) Экспериментальное исследование влияния начальной нагрузки на несущую способность усиленных стержней.
- 2) Теоретическое обоснование результатов эксперимента.
- 3) Анализ результатов исследований.

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

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении экспериментальных данных о влиянии нагрузки усиления на напряжённое состояние сжатых стержней стальных ферм, усиленных с применением сварки.

Практическая значимость будет состоять в создании рекомендаций по методике усиления стержней таврового сечения сваркой.

Апробация работы:

Результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях:

– научно-практическая конференция «Студенческие дни науки в ТГУ» 2020;

– научно-практическая конференция «Студенческие дни науки в ТГУ» 2021.

Публикации:

По результатам работы над диссертацией опубликовано 2 работы в электронных сборниках:

– сборник студенческих работ Научно-практическая конференция «Студенческие дни науки в ТГУ» 2020;

– сборник студенческих работ Научно-практическая конференция «Студенческие дни науки в ТГУ» 2021;

1 Состояние вопроса усиления стальных ферм покрытия промышленных зданий

1.1 Здания и сооружения из металлических конструкций

В новом строительстве чаще начинают использовать здания с металлическим каркасом. Это связано с рядом преимуществ данного материала по сравнению с железобетоном. При одинаковой несущей способности металлоконструкции и железобетонной конструкции вес конструкции из металла будет меньше. Металлические конструкции удобно монтировать, складировать, также они обладают архитектурной выразительностью.

В Российской Федерации возведено большое количество зданий и сооружений из металлических конструкций. К таким зданиям можно отнести склады, промышленные заводы, ангары, эстакады, путепроводы, торговые центры, здания больших пролетов и другие. В качестве основных несущих элементов используют колонны, балки, стропильные и подстропильные фермы.

Многие конструкции претерпели определённый физический и моральный износ и требуют усиления. Необходимость производить усиление определяется по результатам обследования зданий и сооружений. В данной магистерской диссертации будет рассматриваться вопрос влияния начальной нагрузки на несущую способность центрально сжатых стержней, усиленных методом увеличения сечения. В качестве объекта исследования будет использован стержень фермы из спаренных уголков. Поэтому будут рассмотрены общие методы усиления ферм из спаренных уголков, дефекты повреждения и случаи отказов зданий вследствие этих причин.

1.2 Дефекты и повреждения

В строительстве промышленных зданий часто используют металлические конструкции, так как они удобны в эксплуатации и при необходимости увеличения нагрузки могут быть усилены. Как и все материалы у металла есть недостатки. К недостаткам относятся низкая коррозионная стойкость и огнестойкость.

Качество изготовления и монтажа стальных конструкций регламентируются СП и ГОСТ. Но в результате ошибок, отклонения от норм и низкого качества работ при изготовлении и монтаже конструкций происходит отклонения от проектных размеров, качества продукции. В соответствие с СП 13102–2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» «дефекты – это отдельные несоответствия конструкций какому-либо параметру, установленному проектом или нормативным документом (СНиП, ГОСТ, ТУ, СН и др.), полученные конструкцией на стадии изготовления и монтажа, а повреждения – это неисправности, полученные конструкцией при изготовлении, транспортировании, монтаже и эксплуатации.» [5]

Дефекты можно разделить: по месту расположения и месту нахождения. Располагаться дефекты могут на всей поверхности элемента (отличие химического состава от заданных заводом изготовителем), на ограниченных зонах поверхности заготовки, а именно зоны неполной закалки и коррозионного поражения (рисунок 1), также могут иметь место локальные микротрещины. Также дефекты бывают наружными и внутренними.



Рисунок 1 – Коррозия металла

В большинстве случаев дефекты являются устраняемыми; экономически целесообразно устранить, чем заменять на новую деталь. В противном случае этот дефект не устраняется.

«По отражению в нормативной документации дефекты делят на скрытые и явные. Скрытый дефект - дефект, для обнаружения которого в нормативной документации не предусмотрены необходимые правила, методы и средства контроля. В противоположном случае это явный дефект. По причинам

возникновения дефекты подразделяют на конструктивные, производственные и эксплуатационные.» [5]

Разделять дефекты можно на конструктивные, эксплуатационные и производственные.

«Конструктивные дефекты - это несоответствие требованиям технического задания или определенным правилам разработки (модернизации) изделия. Эти дефекты являются следствием несовершенства конструкции и ошибок конструирования. Типичными дефектами конструирования являются: ошибочный выбор материала изделия или режима термической обработки; неверное определение размеров деталей; наличие концентраторов напряжения; ошибки в учете распределения напряжений; неправильный расчет несущей способности; ошибки в моделировании или учете эксплуатационных нагрузок; недостаточная защищенность узлов трения и др.» [5]

«Производственные дефекты - несоответствие требованиям нормативной документации на изготовление, ремонт или поставку изделия. Они появляются в результате нарушения технологического процесса, изготовления, восстановления изделий. При изготовлении изделий возникают дефекты состава материала (включения, охрупчивающие примеси и т.д.), плавка и изготовления заготовок (пористость, усадочные раковины, неметаллические включения, расслоения); механической обработки (ожоги, задиры, заусенцы, трещины, прорезы, избыточная локальная пластическая деформация); сварки (трещины, остаточные напряжения, углубления, недостаточная глубина шва, термическое повреждение отдельных участков основного материала и т.д.); термической обработки (перегрев, закалочные трещины, обезуглероживание, избыточные остаточные аустениты и др.); обработки поверхностей (химическая диффузия, водородное охрупчивание, снижение механических свойств и др.). Механические, химические и температурные воздействия на материалы во время обработки вызывают изменения предела прочности, сопротивления хрупкому разрушению, коррозионной стойкости и др. Возникающие при сборке изделий дефекты делятся на: потерю жесткости соединения; нарушение

контакта поверхностей; дефекты посадки деталей; дефекты размерных цепей. Потеря жесткости появляется в результате ослабления резьбовых и заклепочных соединений. Нарушение контакта - это результат уменьшения площади прилегания поверхностей у соединяемых деталей, вследствие чего прослеживается потеря герметичности соединений и повышение ударных нагрузок. Нарушение посадки деталей порождается увеличением зазора или снижением натяга. Нарушение размерных цепей происходит по причине изменения перпендикулярности, параллельности и т.д., что приводит к нагреву деталей, росту нагрузки, видоизменению геометрической формы, деструкции деталей.» [5]

«Эксплуатационные дефекты - это дефекты, которые появляются в результате износа, усталости, коррозии изделий, неправильной эксплуатации. Наиболее часто встречаются следующие эксплуатационные дефекты: изменение размеров и геометрической формы рабочих поверхностей; нарушение требуемой точности взаимного расположения рабочих поверхностей; механические повреждения; коррозионные повреждения; изменение физико-механических свойств материала деталей. В целом возникающие дефекты деталей и конструкций бывают следующие: нарушение целостности (трещины, обломы, разрывы и др.); несоответствие формы (изгиб, скручивание, вмятины и др.) и размеров изделий. Нарушения целостности (механические повреждения) деталей или изделий возникают из-за превышения допустимых нагрузок (рисунок 2), которые воздействуют на деталь или изделие в процессе эксплуатации, усталости материала деталей, которые работают в условиях циклических знакопеременных или ударных нагрузок. Несоответствие формы (деформации) может появиться у деталей, если на них действуют динамические нагрузки. Дефекты, возникающие у отдельных поверхностей: несоответствие размеров; несоответствие формы; взаимного расположения; физико-механических свойств; нарушение целостности. Изменение размеров и формы (нецилиндричность, неплоскостность и т.д.) поверхностей деталей происходит в результате их

изнашивания. Изменение взаимного расположения поверхностей происходит вследствие: неравномерного износа поверхностей; внутренних напряжений; остаточных деформаций.» [5]

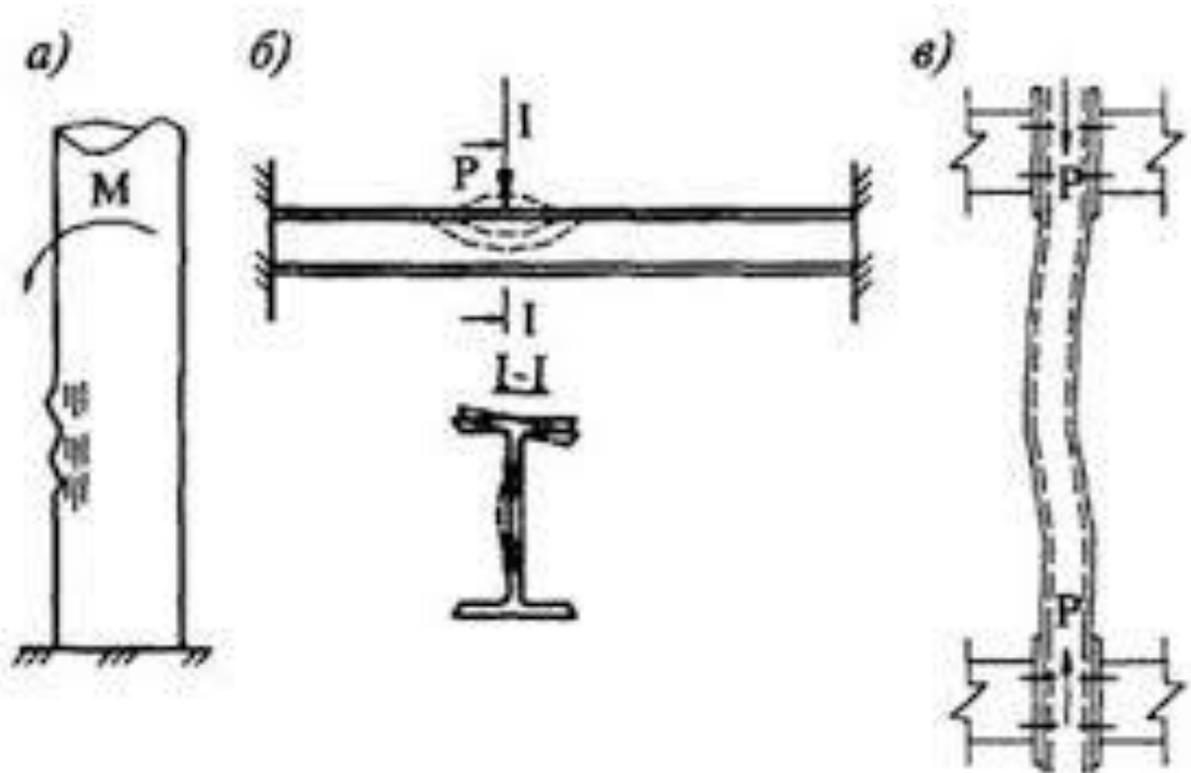


Рисунок 2 – Деформирование стержня

Повреждения стальных конструкций можно разделить на силовые, температурные, химические и электрохимические.

Повреждения конструкций появляются в результате наличия дефектов или нарушения правил эксплуатации здания, оборудования. Также из-за силовых нагрузок могут возникнуть повреждения, если при проектировании было несоответствие предпосылок действительным условиям работы конструкций.

В результате таких повреждений и дефектов может обрушиться здание, потеряв несущую способность в несущих элементах конструкций.

1.3 Случаи обрушения стальных ферм

1) Обрушение металлических конструкций покрытий на монтаже при строительстве сборочно-сварного цеха машиностроительного предприятия.

В сборочном цехе в 1962 г., который представлял из себя здание с двумя пролетами по 36 м, длиной 198 м, высотой до верха фермы 26,95 м (рисунок 3) имеет вес металлических конструкций 2540 т, были обрушены: две подстропильные фермы, семь стропильных ферм, металлические связи по нижним и верхним поясам стропильных ферм, связи и импостные уголки по фонарям, подкрановая балка, две фахверковые стойки. Общий объем обрушившихся конструкций составил 107 т. [2]

Доставленные на площадку стальные конструкции имели дефекты в узловых соединениях ферм (стропильных и подстропильных). После внешнего осмотра выявленные дефекты были исправлены электросварщиками на строительной площадке.

В результате обследования было обнаружено, что в узлах ферм были разрывы прокатного листа, который находился в опорном раскосе верхнего пояса подстропильной фермы. В фонарных рамах также были разрывы в металлических конструкциях в среднем узле ригелей. Контроль качества применяемого металла был выполнен в лабораториях на восьми образцах, которые были вырезаны из конструкций. Результаты показали, что металл был из стали марки СтЗсп. [35]

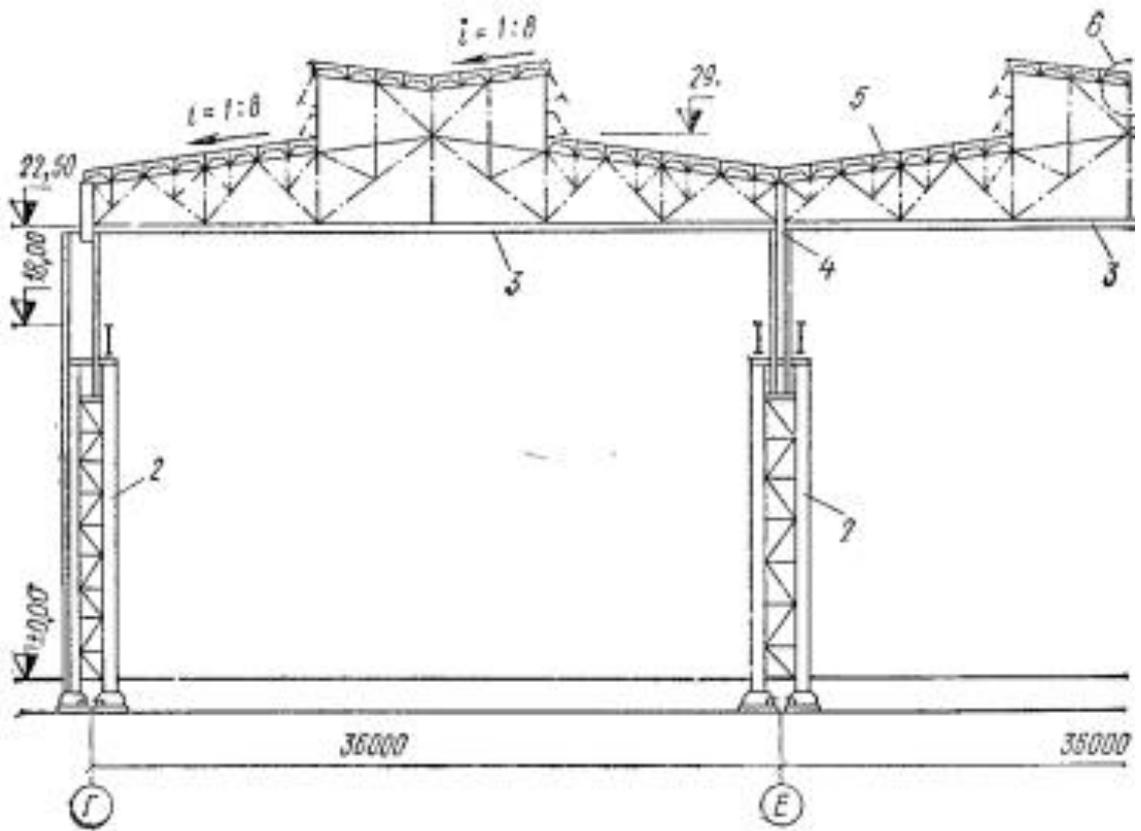
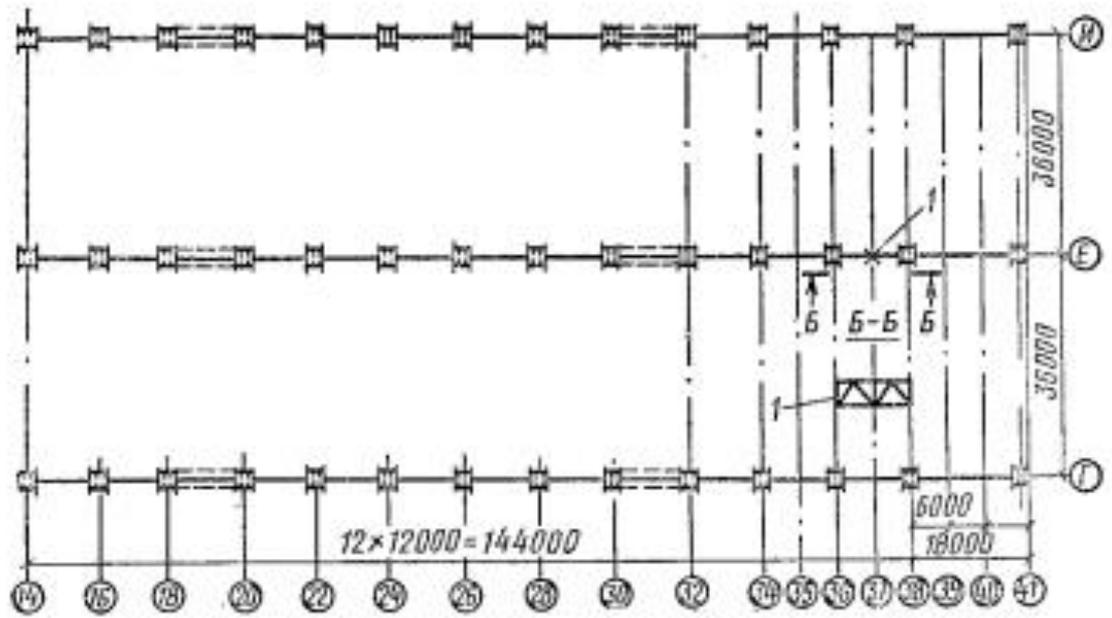


Рисунок 3 – Сборно-сварочный цех

- 1 — разрушенный узел подстропильной фермы; 2 — колонна; 3 — ферма;
 4 — подстропильная ферма; 5 — железобетонные плиты покрытия;
 6 — разрушенный узел фонаря

2) В 1997 году обрушились две фермы производственного корпуса ОАО «Пензхиммаш» (рисунки 4,5). [40]

Разрушение двух ферм, находящихся рядом с пристроенным зданием, где перепад высот составлял 4м, произошло из-за потери устойчивости опорного раскоса и последующего разрушения верхнего пояса. [17]



Рисунок 4 – Обрушение пролета ОАО «Пензхиммаш»



Рисунок 5 – Характерные повреждения металлических конструкций после обрушения

Причиной аварии являлось температурное воздействие. Температура в это время изменилась на большие значения с $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$. [41] В этот период также выпало большое количество осадков в виде снега, что привело к возникновению снегового мешка на крыше в месте перепада высот с краю здания. Из-за чего нагрузка на кровлю вместе с снеговой нагрузкой превысила максимальную нагрузку, которую закладывали проектировщики на стадии проектирования, примерно в два раза. [20]

Обследование показало, что опорные раскосы фермы имели сечение меньше чем указано в проекте [37], состав кровли тоже отличался от проектного: вместо покрытия, которое составляло 63 кгс/м^2 , была использована бетонная стяжка, что составило 330 кгс/м^2 . [10]

Авария показала, что нельзя отступать от проекта. А именно использовать материалы имеющие меньшие характеристики, использовать

элементы, имеющие меньшие несущие способности, эксплуатировать здание не надлежащим образом. Чтобы избежать таких аварий необходимо моделировать процессы развития аварийных ситуаций. [28]

Склад руды, обрушение блока из двух стропильных ферм.

«Обрушение стропильных ферм у 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]

Крепление фермы выполнялось при помощи шарнирного листового узла для соединения нижнего пояса фермы с рамой. Крепление верхнего пояса выполнено аналогичным образом, что и нижний пояс. Из-за этого пояса фермы в ее плоскости не обладали непрерывной жесткостью. Данное конструктивное решение для фермы могло потерять устойчивость даже при малых усилиях. Монтажные связи между фермами не были закреплены должным образом, где-то не хватало болтов, а где-то и вовсе была использована проволока. Авторский надзор упустил это из виду во время проверки. Обрушение здания произошло сразу после монтажа. По словам очевидцев, корпус начал качаться, а потом фермы потеряли устойчивость в нижнем поясе и часть здания обвалилась.

Было проведено обследование этого здания и выявлено следующее: Сталь стропильных ферм была из СтЗпс и некоторые СтЗсп, сварка выполнена с помощью электродов Э-42 и Э42А.

«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.»[1]

«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.»[1]

1.4 Усиление стальных ферм

Для продления срока службы здания, необходимо выполнять усиления конструкций. Усиление конструкций также затрагивает долговечность и повышение несущей способности конструкций. Усиление - это увеличение несущей способности с помощью усиления как отдельных частей конструкции, так и её в целом. Усиленная конструкция должна выдерживать нагрузку, которая требуется для дальнейшей эксплуатации здания. В промышленных зданиях чаще всего усиление требуется для стропильных или подстропильных ферм и основные конструкции стального каркаса.

Усиление всегда происходит из-за того, что поменялись условия работы конструкций или наличие каких-то повреждений, дефектов. Классификация причин показана на рисунке 6.

Временное, капитальное, неотложно аварийное усиление выбирается в зависимости от условий при которых эксплуатировалось здание, способа выполнения работ, используемого материала.

До капитального усиления сначала выполняют временное усиление, чтобы эксплуатировать здание дальше. Временные работы по усилению выполняется в короткий срок, и конструкция имеет непродолжительный период службы. Для выполнения такого усиления необходимо закрепить конструкцию, для этого используют тросы, тяжи канаты и др. Для соединения используют болты.

Если конструкция находится в предельном состоянии, то для предотвращения обрушения здания или потери устойчивости элемента и как

вследствие конструкции в целом необходимо проводить неотложное–аварийное усиление.

После капитального усиления усиленная конструкция имеет продолжительный срок службы. Для усиления используют строительную сталь. Усиление элементов производится чаще с помощью сварки. Основная проблема при усилении сжатых, усиливаемых увеличением сечения стержней фермы, влияние технологических параметров сварки.

«Существующие традиционные приёмы усиления ферм по конструктивному признаку можно подразделить на усиление в целом и местное усиление, как показано на рисунке 7.»[12]

«Усиление изменением расчётных и конструктивных схем является наиболее эффективным в тех случаях, когда требуется усилить большое число элементов конструкции. Принцип такого усиления заключается в том, что изменением конструктивных и расчётных схем достигается перераспределение усилий в конструкциях, обеспечивающее более рациональную их работу.»[12]

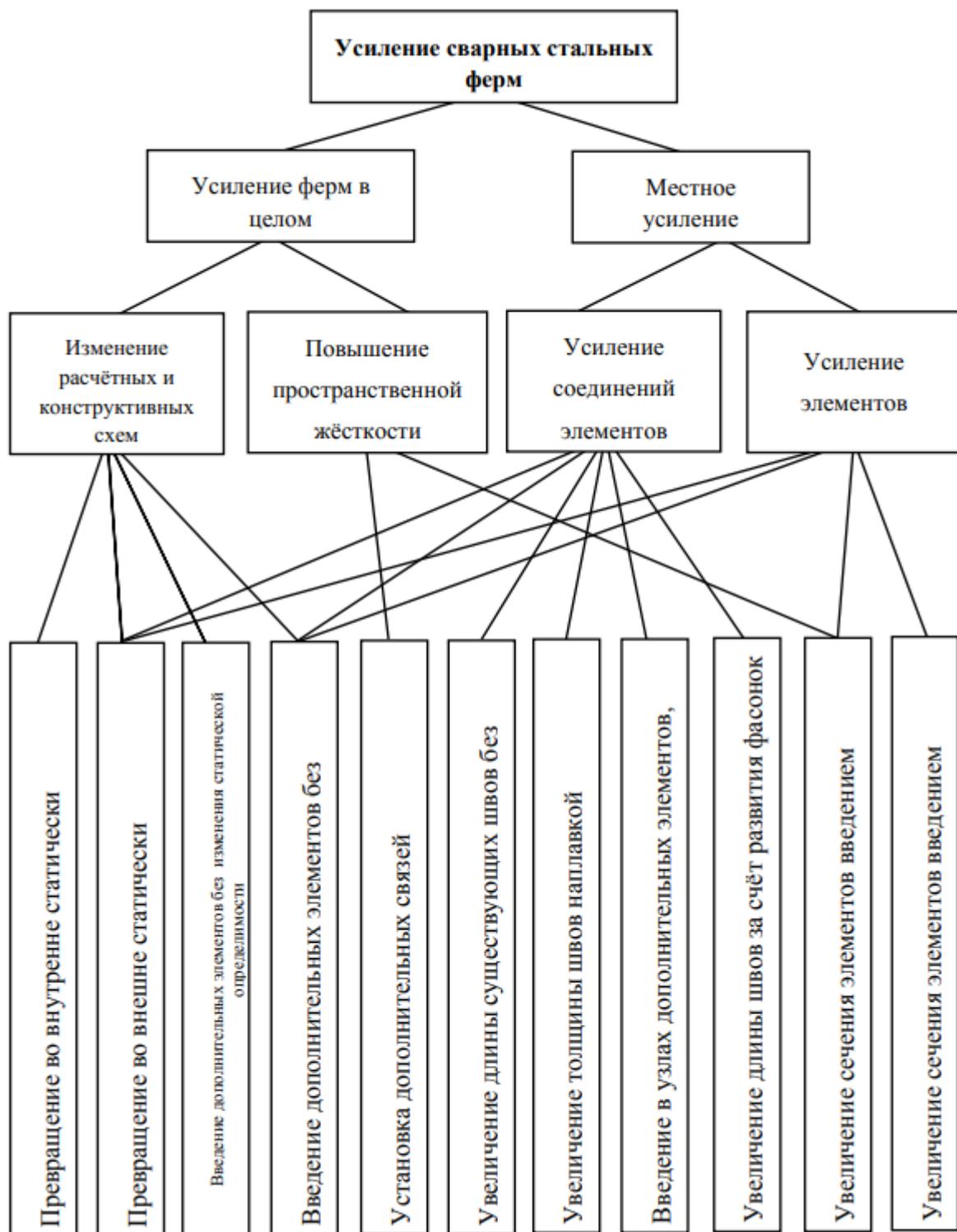
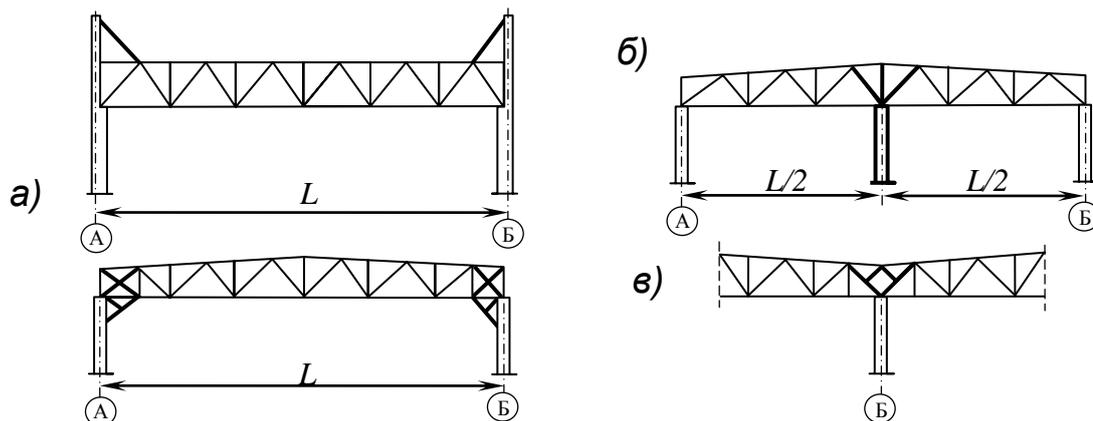
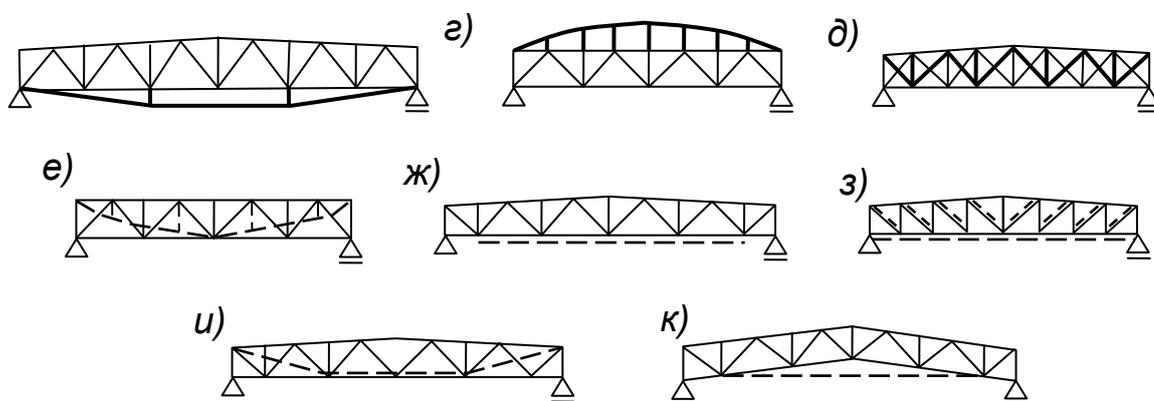


Рисунок 6 – Классификация усиления сварных стальных ферм

Превращение во внешне статически неопределимые



Превращение во внутренне статически неопределимые



Введение дополнительных элементов без изменения статических свойств

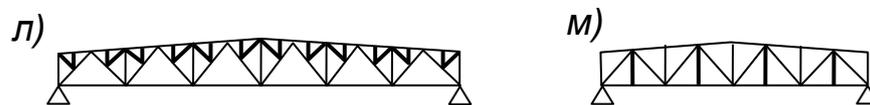


Рисунок 7 – Усиления ферм изменением расчетных и конструктивных схем

Осуществить усиление такого типа можно тремя способами:

1) превращением во внешне статически неопределимые системы путем жёсткого заземления концов ферм введением подвесок и подкосов (рисунок 7, а), подведением дополнительных опор (рисунок 7, б), обращением в многопролётные (рисунок 7, в); [42]

2) превращением во внутренне статически неопределимые системы, выполняемым как без предварительного напряжения – путём введения третьего пояса (рисунок 7, г) или отдельных элементов (рисунок 7, д), так и с

предварительным напряжением – постановкой предварительно напряжённых затяжек (рисунок 7, е–к);

3) введением дополнительных элементов без изменения статической определимости (рисунок 7, л, м).

«Усиление ферм путём повышения пространственной жёсткости достигается постановкой дополнительных связей, тяжей, увеличением сечения стержней и т.п. Необходимость повышения пространственной жёсткости конструкции может быть вызвана неудовлетворительной развязкой всего сооружения или отдельных его элементов, устройством подвесного транспорта и т.д.»[13]

«Местное усиление конструкций, в том числе и ферм, является наиболее распространённым при эксплуатации промышленных зданий. Это объясняется, во–первых, необходимостью усиления, в основном, небольшого числа элементов и, во–вторых, сравнительной простотой производства работ.»[13]

Местное усиление ферм предполагает:

- 1) усиление соединений;
- 2) усиление отдельных стержней.

«Усиление соединений может выполняться с введением в узлы дополнительных элементов (наклонных планок, коротышей, накладок, дополнительных фасонок и т.д.), а также без введения дополнительных элементов, путём увеличения катетов и длин существующих сварных швов.»[13]

«Усиление отдельных стержней может осуществляться как самостоятельно (при необходимости, как уже было отмечено выше, усиления небольшого числа элементов), так и совместно с усилением конструкции в целом. Усиление отдельных стержней ферм достигается:»[13]

- а) увеличением сечения введением дополнительного металла;
- б) введением отдельных дополнительных стержней и узлов, соединительных планок, накладок и т.д.

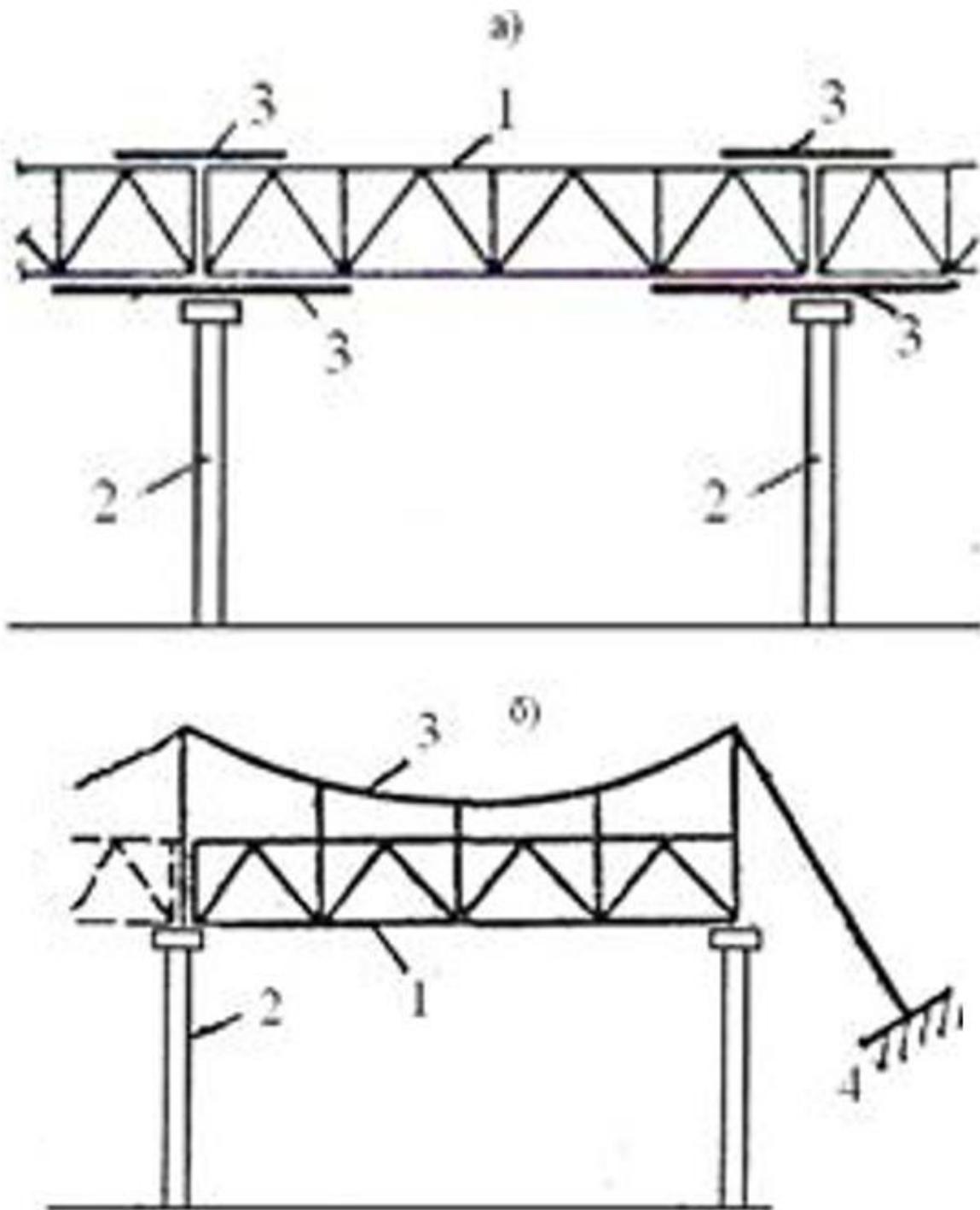
«Метод увеличения сечения является одним из наиболее часто и эффективно применяемых. Суть метода заключается в присоединении дополнительных, стержневых элементов усиления к существующим стержням и включении их в общую работу по восприятию усилий, возникающих в элементах от внешних воздействий.»[13]

«Присоединение элементов усиления выполняется на сварке. Величина сварных швов в существующей на данный момент литературе различна. Например, в некоторой литературе пишут, что для прикрепления усиливающих элементов нужно применять сплошные сварные швы. Но автор работы [9] считает, что можно в случае отсутствия опасности хрупкого разрушения применять прерывистые швы.»[13]

«Выбор схемы усиления определяется в зависимости от работы усиливаемых стержней. Во время усиления центрально сжатых и центрально растянутых стержней ферм необходимо стремиться к сохранению центровки, чтобы центры тяжести усиленных сечений совпадали с центрами тяжести основных сечений или находились вблизи них. В случае сжатия нужно также не забывать об увеличении изгибной жёсткости усиливаемых стержней»[19]

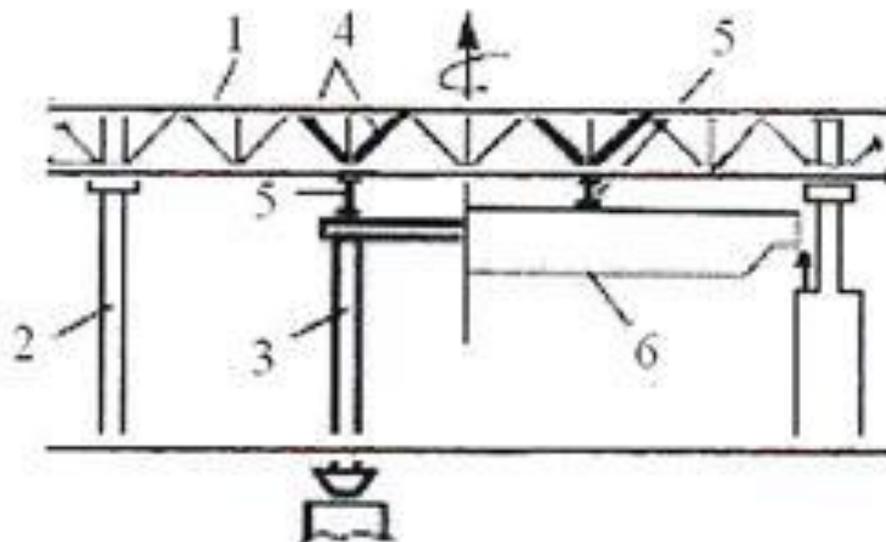
«Превращение конструкций в статически неопределимые системы осуществляется во время усиления элементов. Этого результата получается достигнуть за счет:»[19]

- объединения концов ферм смежных пролетов и превращения их в многопролетные конструкции (рисунок 8);
- подведения дополнительных опор (рисунок 9);
- надстройки поддерживающих тросовых систем;
- введения шпренгельных элементов;
- установки поддерживающих арочных конструкций (рисунок 10);
- введением дополнительных элементов решетки, изменением схемы конструкции и увеличением сечения отдельных элементов (рисунок 11).
- подведения подкосов или подвесок (рисунок 12);
- увеличение сечения стержней.



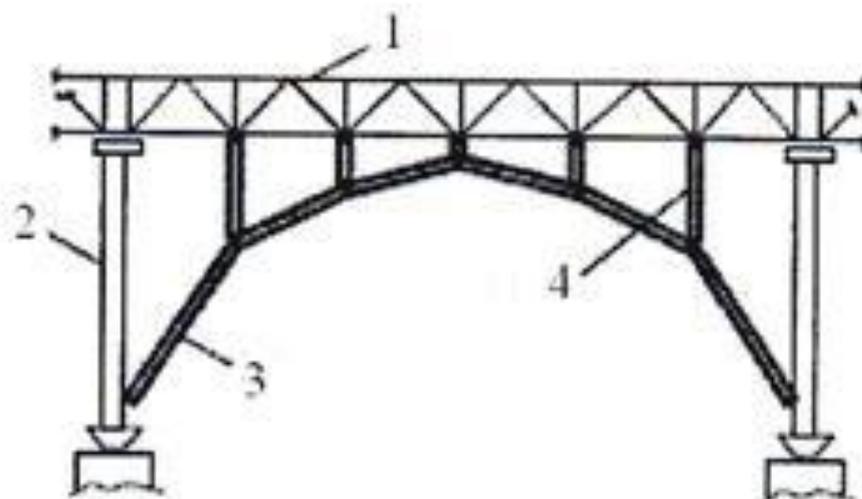
1-ферма; 2- стойка; 3- монтажные элементы усиления; 4- прикрепление тросов

Рисунок 8 – Превращение в неразрезные многопролетные конструкции металлических стропильных ферм или надстройки висячих систем



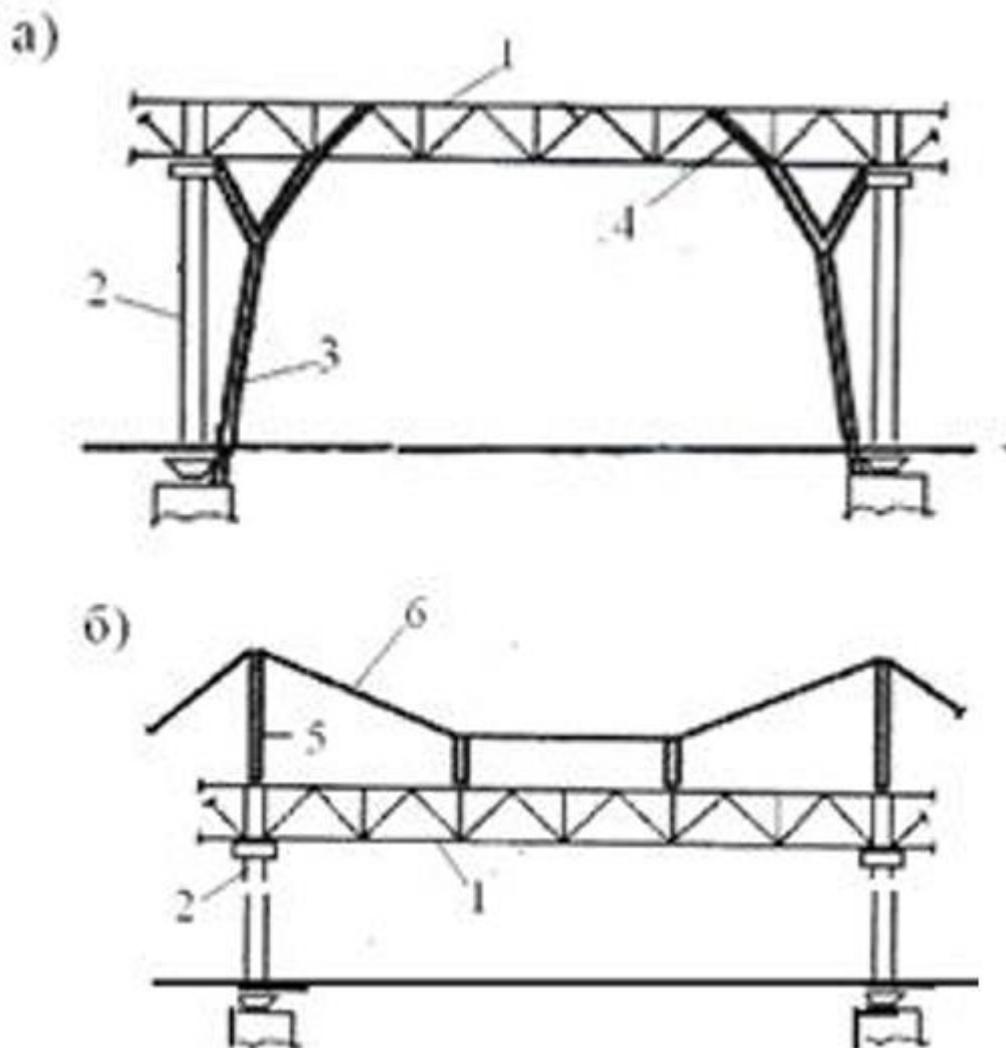
1- ферма; 2- колонна; 3- промежуточная опора; 4- монтажный элемент усиления фермы; 5- металлическая балка; 6- мостовой кран

Рисунок 9—Установка промежуточных дополнительных опор



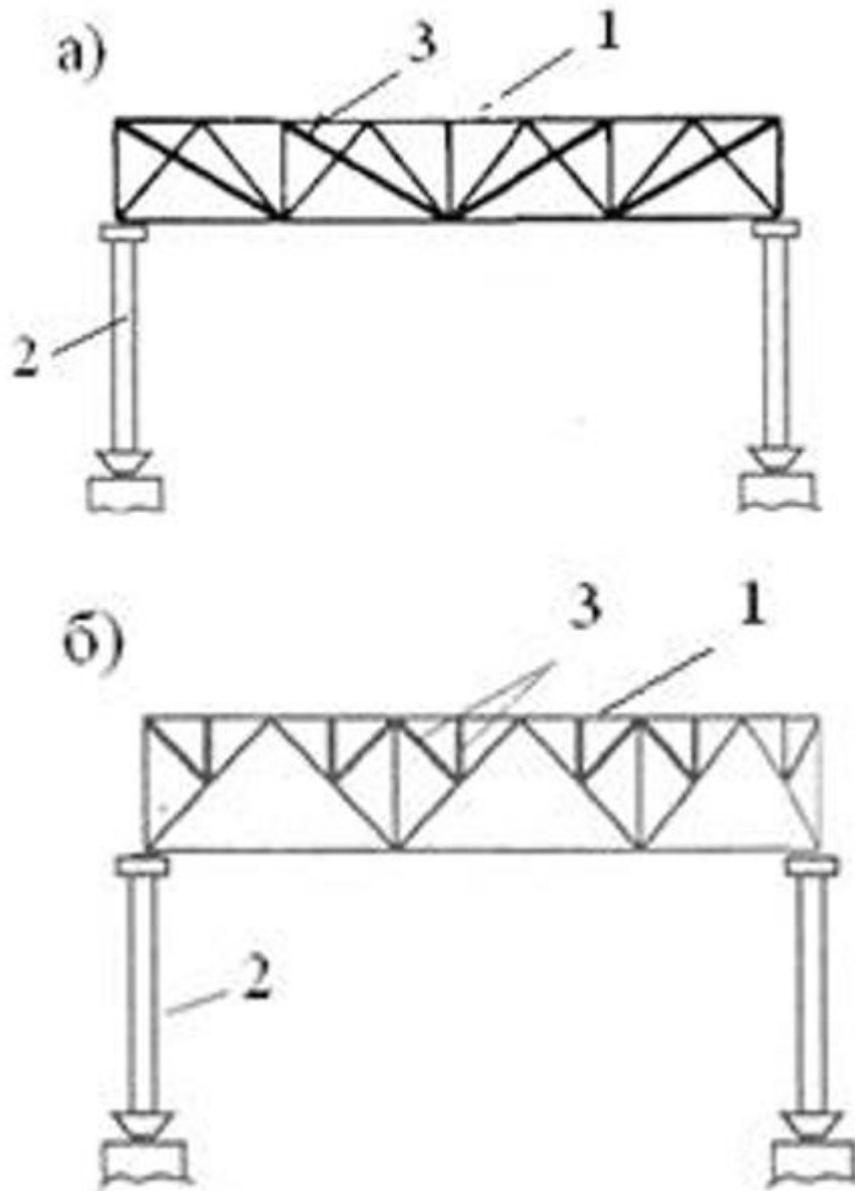
1- усиливаемая ферма; 2- колонна; 3- арочная конструкция; 4- передаточные стойки

Рисунок 10 – Усиление стропильных ферм путем установки поддерживающей арочной конструкции



1- усиливаемая ферма; 2- колонна; 3- подкос; 4- элемент усиления фермы; 5- пилон; 6- подвеска

Рисунок 11– Усиление ферм способом установки подкосов (а) и подвесок (б)



1-усиливаемая ферма; 2- колонна; 3- дополнительные элементы решетки

Рисунок 12 – Усиление стропильных ферм путем введения дополнительных элементов решетки (а) или шпренгельных элементов решетки

Усиление составных стержней из спаренных уголков часто производят методом увеличения сечения. Этот метод включает в себя увеличение сечение с помощью труб, уголков или листового проката. Максимальная эффективность достигается при усилении наиболее напряженных элементов или усилении

отдельных дефектных мест. Различные способы усиления приведены на рисунке 13. [3]

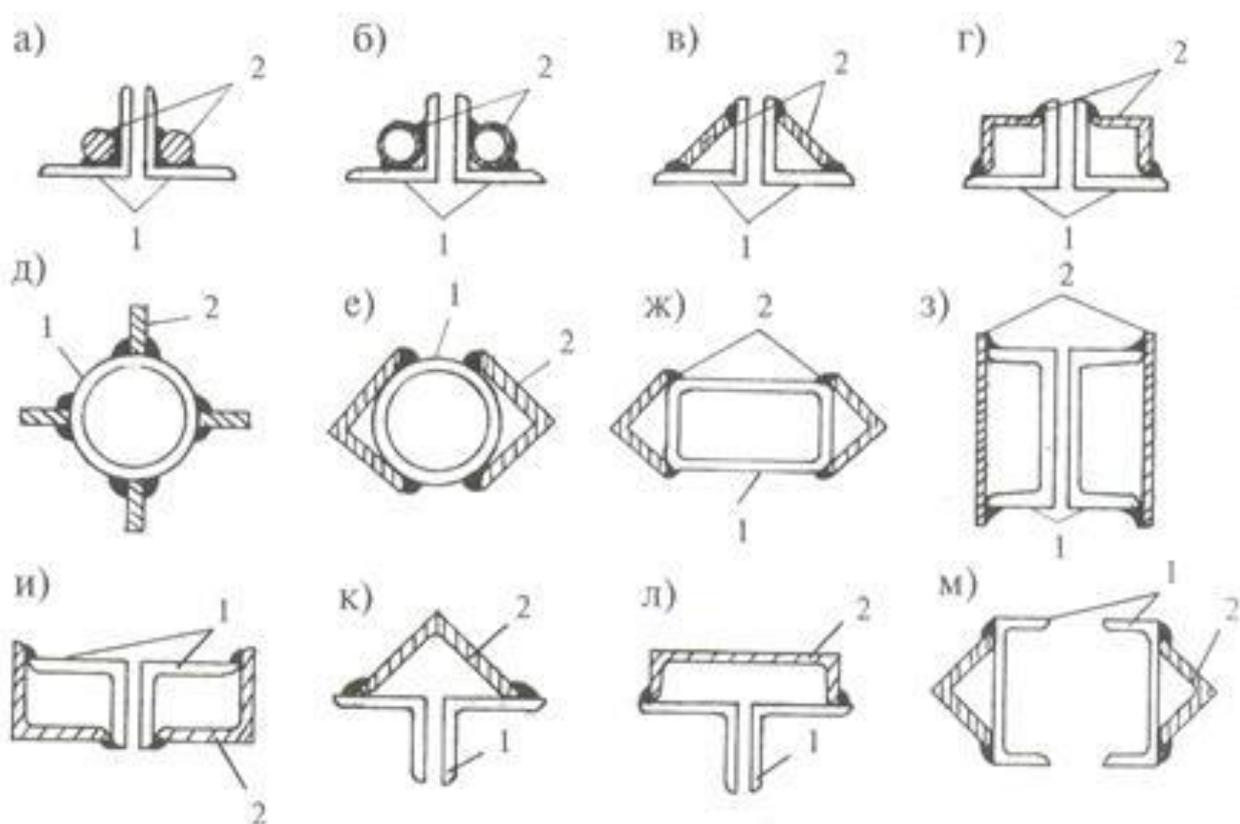


Рисунок 13 – Схемы усиления центрально-растянутых и центрально-сжатых элементов металлических ферм увеличением их сечения

Производить усиление нужно с помощью приваривания дополнительного элемента. Некоторые считают, что для этого необходимо полностью разгрузить ферму и начинать приваривать элементы уже на площадке. Другие считают, что присоединять элементы на сварке можно не разгружая ферму. [11]

В научном труде [5] приведены схемы для усиления стержней стальных стропильных и подстропильных ферм. На рисунке 14 можно видеть различные схемы, с помощью которых можно производить усиление стержней стальной стропильной фермы.

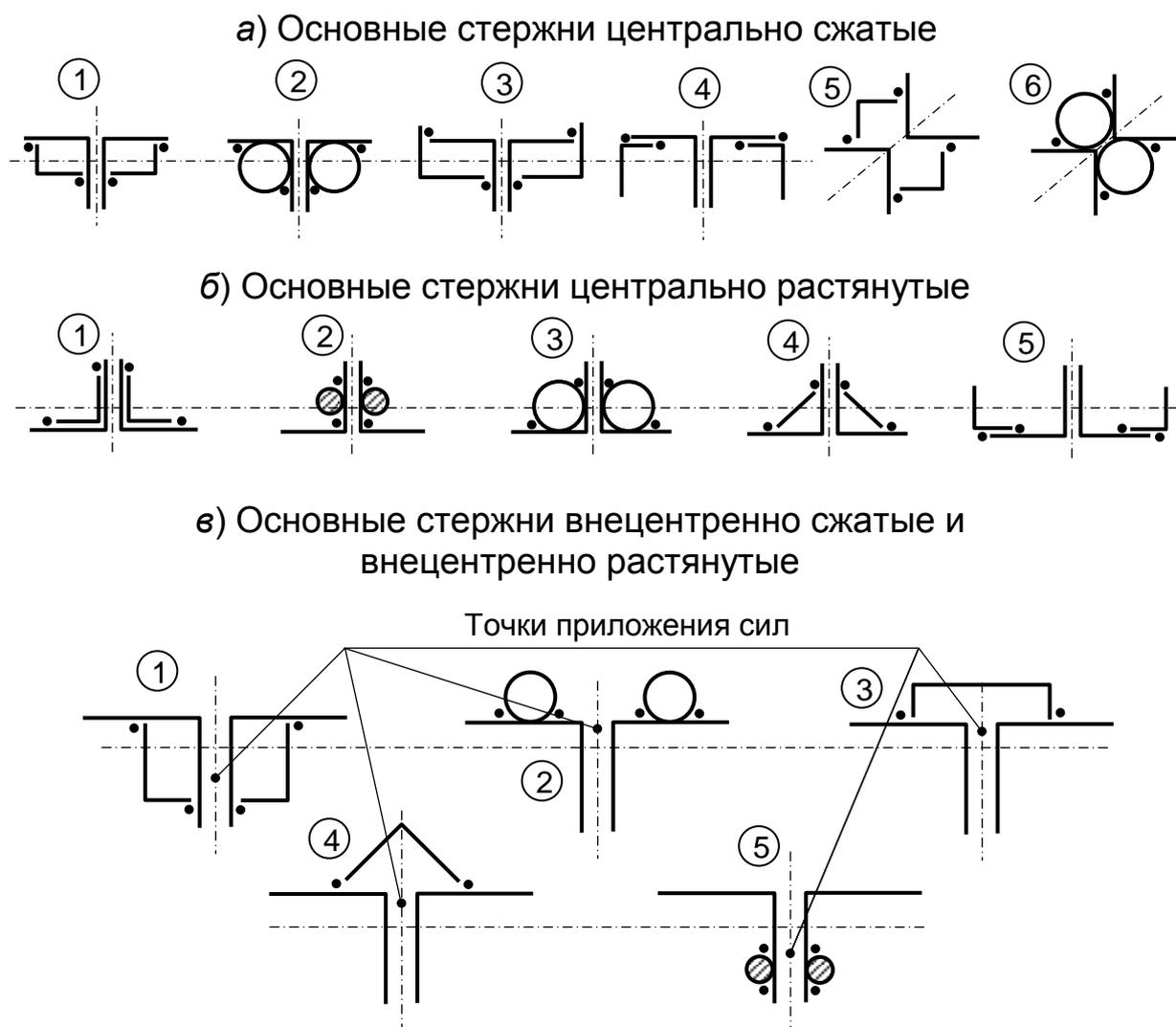


Рисунок 14 – Схемы усиления стержней фермы из спаренных уголков

Наиболее эффективный результат усиления дают схемы усиления стержней, показанные на рисунке 14.

1.5 Основные сведения о сварке

Сварка – это процесс, который нужен для получения соединений металла, путем сплавления, при достижении металла до жидкости плавления в местах соединения металлов и электрода. [36]

На строительстве чаще применяют дуговую сварку. Дуговая сварка - основной вид сварки строительных конструкций – происходит это

плавлением, как показано на рисунке 15, позиция а, нагревается и расплавляется металл с помощью электрода 1 и кромок элемента 2 с помощью электрической дуги, между сплавляемыми деталями и электродом. [4]

Дуга, создаваемая электродом, появляется при температуре 6000 градусов по Цельсию и металл электрода начинает плавиться вместе с элементом. После того как элемент остынет можно увидеть, что между свариваемыми деталями образовался наплавленный металл, сварной шов 4.

«Под температурой 6000 °С дуга плавит металл и элемент создавая сварной шов. В зоне появления дуги под действием электромагнитных сил в зоне горения дуги, как показано на рисунке 15 схема б, происходит движение газов, они идут от электрода к детали. В элементе образуется кратер от давления газов, происходит это потому что выталкивается расплавленный металл из зоны, где происходит горение дуги. При появлении кратера создается большее проплавление металла, что приводит к более прочному шву.»[12]

«Глубина, на которую происходит проплавление металла, называется глубиной провара. При ручной дуговой сварке глубина проплавления достигается одного или двух мм, при специальных сварках глубина увеличивается.»[12]

«Разогрев основного металла может быть недостаточным, тогда он может совсем не быть жидком состоянии, присадочный металл (металл электрода) застынет на изделии и молекулярного соединения металлов в один сплав не произойдет. Такое явление называется непроваром.

При чрезмерном разогреве изделия возможно интенсивное проникновение кислорода воздуха внутрь стали свариваемого изделия и ее загрязнение оксидами, а также выгорание углерода, марганца и других необходимых компонентов стали. Такое явление называют пережогом. Пережог резко снижает прочность стали и не может быть исправлен. Пережженный металл надо полностью удалять из сварного соединения.

Находясь в жидком состоянии, металл электрода и сварочной ванны поглощает из воздуха кислород и азот, которые, частично растворяясь в нем,

делают структуру наплавленного металла хрупкой и неоднородной, склонной к старению. Эти вредные влияния в значительной степени устраняются, если для сварки применяют электроды с покрытием и если сварка производится короткой дугой. Длина дуги определяется расстоянием между дном кратера сварочной ванны и концом электрода. Обычно нормальная длина дуги $0,5 \dots 1,1 d$, где d - диаметр электрода.» [12]

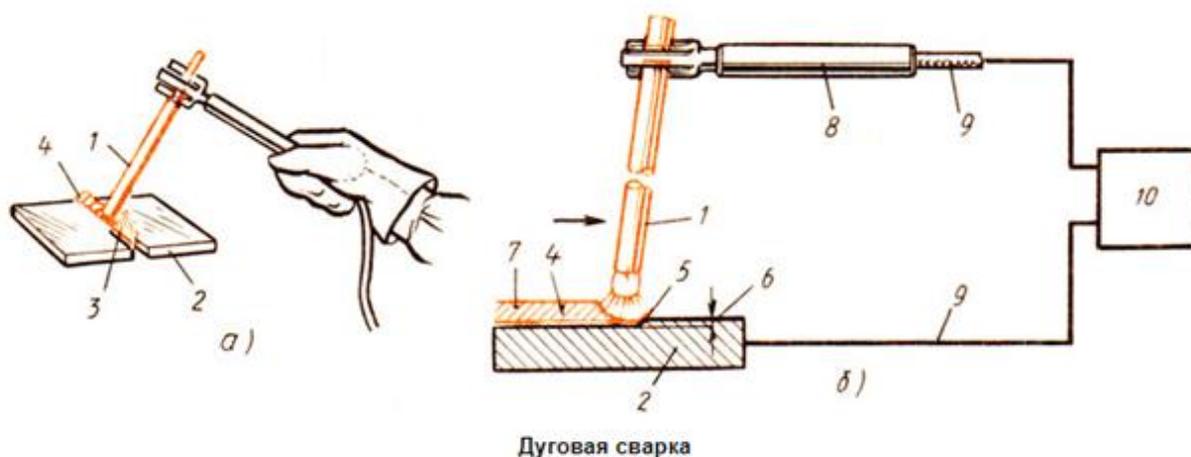


Рисунок 15 – б - схема сварки, а - ручная сварка

Электроды имеют покрытие, которое необходимо чтобы при его плавке в процессе сварки появлялась газовая среда, которая должна защищать металл шва от действия воздуха. Также покрытие дает стабилизацию горения дуги, повышает качество металла шва, а еще делает легче процесс сварки. Используют в качестве покрытия два вида – это тонкие и толстые, более качественные. Тонкие покрытия дают повышенную устойчивость дуги, но почти не защищают металлический шов от азота, кислорода в воздухе. Электроды, которые используют толстое покрытие, имеют шов с механическими свойствами почти такими же как основной металл, что дает прочный шов между сплавляемыми элементами. В состав покрытий входят такие вещества как известняк, плавиковые шпаты, оксиды металлов, ферросплавы или другие.

Для ручной дуговой сварки используют различные аппараты: инверторы, выпрямители, трансформаторы.

Инвертор – это сварочный аппарат, который подключается к 380 или 220 вольт. В состав этого аппарата входит диодный мост, электронная плата, а также небольшие трансформаторы. Агрегат использует ток сети с частотой 50 Гц и преобразует в постоянный ток. Частота после преобразования получается около 100 кГц. Дальше идет понижения вольт до 48-90 и сила тока повышается примерно до 180 ампер.

Еще есть инверторы, в которых устанавливают катушки с проволокой и подключают горелки от полуавтомата. Некоторые модели могут использовать для сварки неплавящиеся электроды из вольфрама в среде аргона. Такие инверторы имеют более широкое распространение и функционал чем обычные.

Выпрямители – это агрегат, который используется для ручной дуговой сварки в промышленных условиях. Он так же преобразует электрический ток и работает чаще от 380 вольт. Отличие от других сварочных аппаратов является создание гладких швов с характерным шелестом. Используется для сварки ответственных изделий и подходит для стационарного использования, так как не удобны для транспортировки. [43]

Сварочные трансформаторы представляют собой катушку с первичной и вторичной обмоткой. Эти элементы нужны, чтобы увеличить силу тока и понизить напряжение. В этом аппарате так же есть возможность регулировать сварочный ток. Так же есть небольшие трансформаторы для ношения на плече и крупные. Из-за сварки на переменном токе использовать его можно для неответственных конструкций.

На площадке применяют монтажную сварку для соединения элементов. Используют сварку: ручную, полуавтоматическую, под флюсом.

Сварка, которую выполняет человек с помощью штучных электродов, называют ручной дуговой. При выполнении этой сварки электрод удерживают в нужном положении и перемещают между свариваемыми элементами вручную. (рисунок 15) [44]

Дуговая сварка – вид сварки, в которой для сваривания элементов используется электрическая дуга.

Для сварочной дуги чаще используют электрический разряд, который происходит между электродами, или между деталью и электродом.

Электрическая цепь с источником питания необходима для получения дуги. Для этого используют сварочные аппараты. Для питания дуги необходим переменный электрический ток, который нужно преобразовать с помощью трансформатора, а при постоянном токе используют преобразователь. Как показано на рисунке 16 один провод идет к свариваемой детали, а второй к электрододержателю.

После включения аппарата сварщик путем соприкосновения электрода и детали зажигает дугу и во время сварки поддерживает её горение. Для получения дуги на клеммах источника питания должно быть напряжение примерно десятки вольт. Сила тока в аппарате может достигать несколько тысяч ампер.

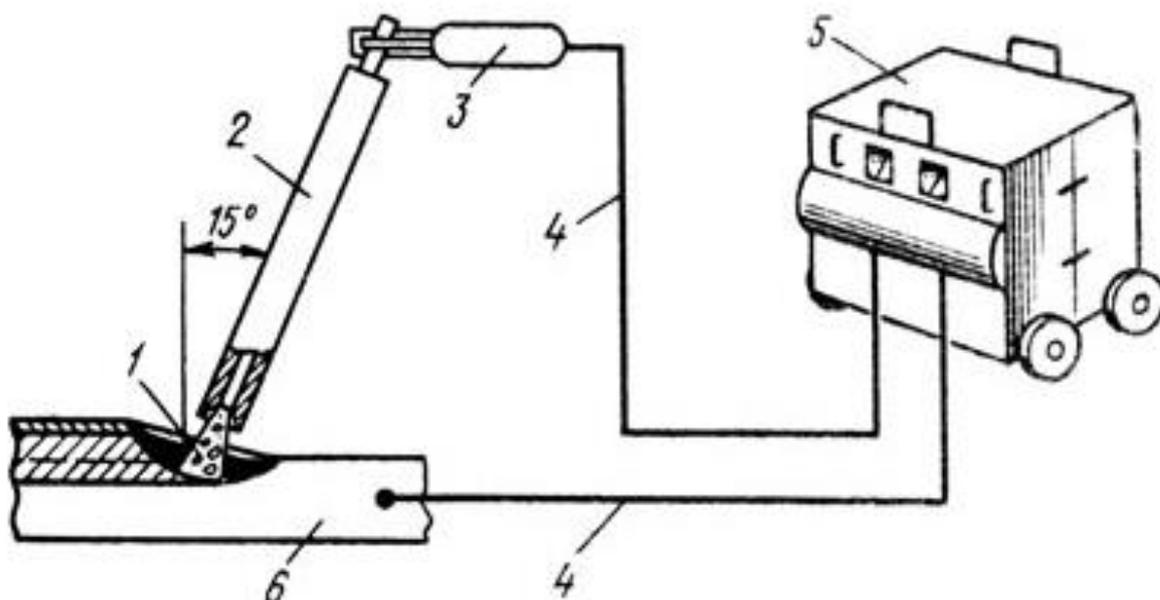


Рисунок 16 – Сварочная электрическая цепь с дугой

Существует два вида электродов используемых для ручной дуговой сварки. Они бывают плавящимися и не плавящимися. К плавящимся можно отнести медные, стальные и другие. Не плавящиеся бывают графитовые, угольные. [45]

Основная маркировка электродов показывает какова минимальная временная устойчивость к разрыву в кгс/мм². Наиболее распространены следующие марки: [18]

– Э38, Э46, Э50 – для операций со сталью с сопротивлением менее 500 Дж/см²;

– Э42А, Э46А – для большей ударной вязкости шва;

– Э55 – для сваривания предметов сопротивляемостью более 500 Дж/см²;

Напыление может содержать различные вещества, легирующие шов или придающие ему дополнительные качества. Существует следующая классификация продукции по видам напыления: [53]

– А – с содержанием различных металлических оксидов, такой продукт считается стандартным;

– Б – с добавлением фтористого кальция, их удобно использовать для сварки больших сечений и высоколегированных сплавов;

– Ц – имеют в своей структуре целлюлозу для образования малого слоя шлака и применяются для операций с тонкими деталями;

– Р – рутиловая поверхность, обеспечивающая хорошие показатели формирования сцепления рабочих заготовок;

– П – другие разновидности напыления.

При выполнении сварки плавящийся электрод необходимо подавать в дугу и выдерживать постоянную длину дуги. При выполнении сварки с неплавящимся электродом дуга увеличивается и на протяжении всей сварки необходима корректировать длину дуги (рисунок 16, 17).

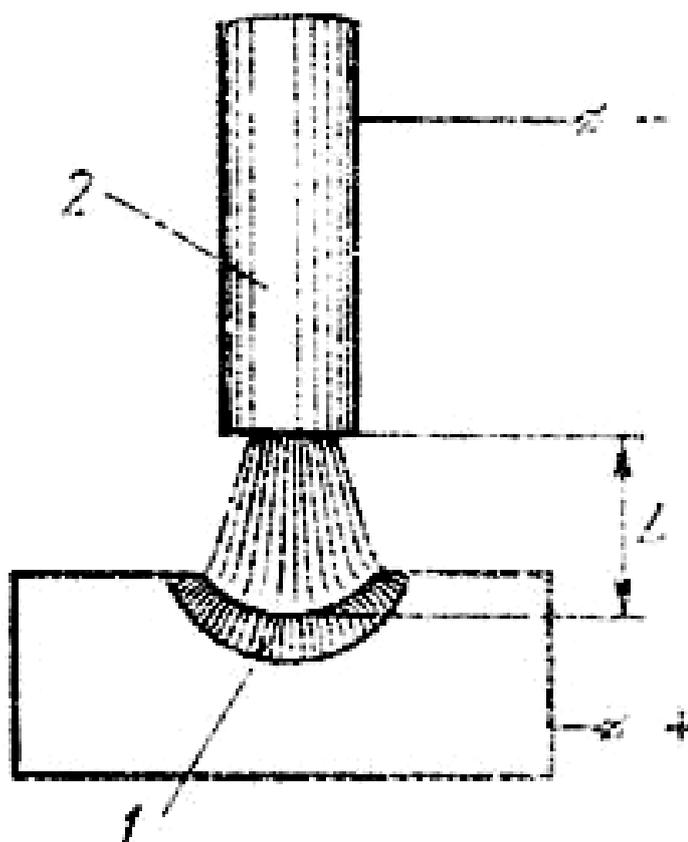


Рисунок 17– Сварочная дуга: 1- сварочная ванна, 2 – электрод

У электродов есть различные покрытия, которые нужны для повышения качества шва металла. Для покрытия используют порошкообразные материалы на клеящем растворе. За счет газов и шлака происходит защита металла от попадания воздуха. Покрытие для электродов используют в ручной дуговой сварке, чтобы сварщик мог выполнять швы в любом положении и даже в труднодоступных местах. [7]

На рисунке 18 показан процесс сварки под флюсом. В качестве электрода используют металлическую проволоку. Сварка под флюсом выполняется полуавтоматической сваркой или автоматической. [46]

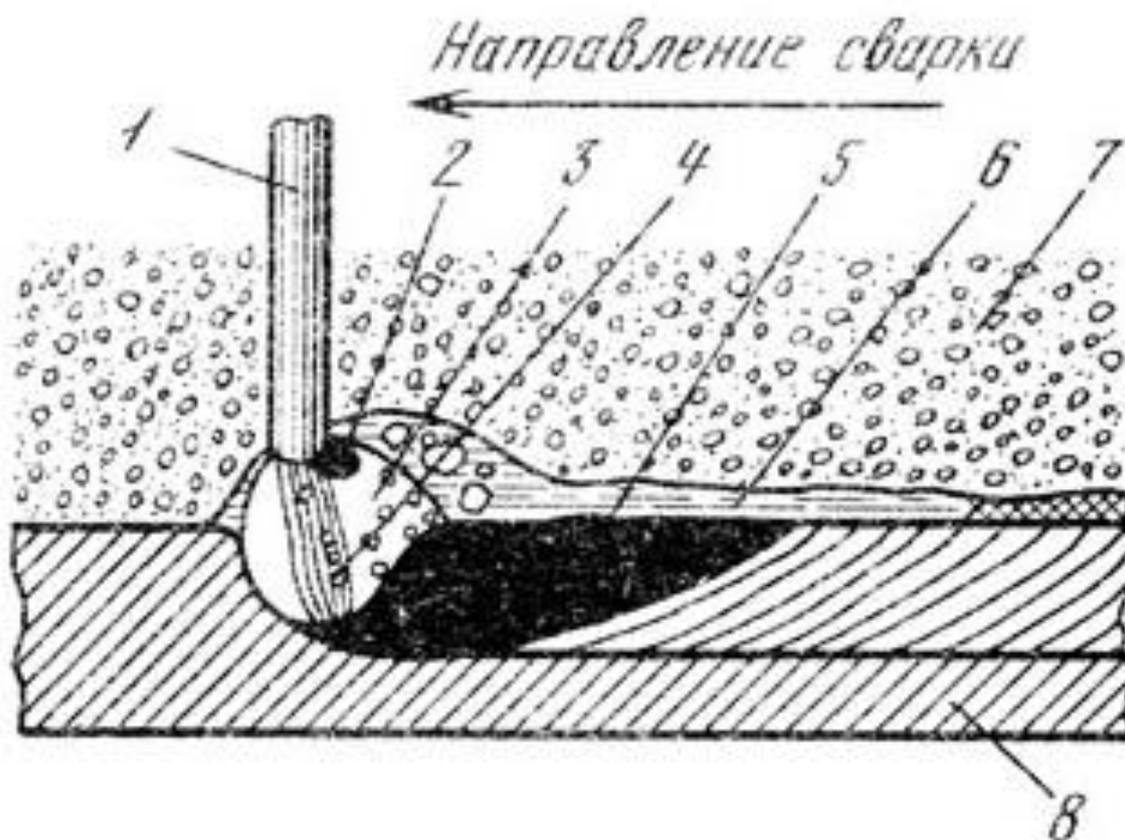


Рисунок 18 – Процесс сварки под флюсом: 1 - электродная проволока, 2 - образующаяся капля, 3 - газовый пузырь, 4 - дуга, 5 - сварочная ванна, 6 - расплавленный флюс, 7 - нерасплавленный флюс, 8 – изделие

«Соединение, выполняемое сваркой плавлением, состоит из четырех зон: первая - металл шва, вторая - зона сплавления, третья - зона термического влияния и четвертая - основной металл (рис. 19). Основной металл - металл подвергающихся сварке соединяемых частей. Зона термического влияния - участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменяются в результате нагрева и пластической деформации при сварке.» [12]

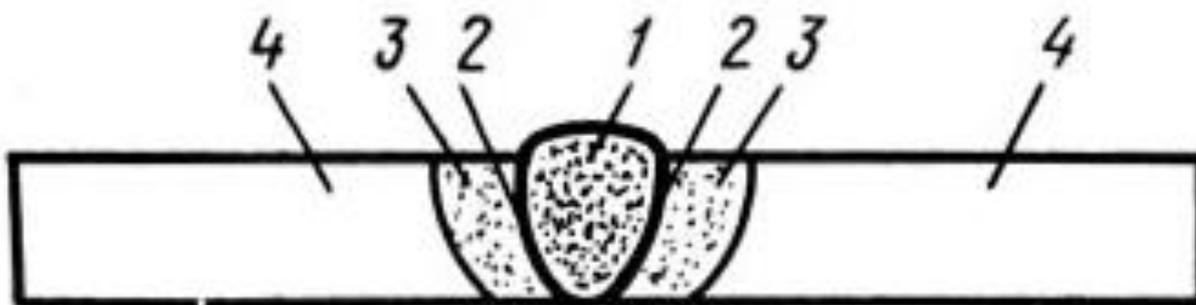


Рисунок 19 – Зоны сварного соединения: 1 - шов при сварке плавлением, 2 - зона сплавления, 3 - зона термического влияния, 4 - основной металл

Металл шва образовывается переплавленным основным и наплавленным металлами или только переплавленным основным металлом. [47]

Сварным соединением являются соединение нескольких деталей с помощью сварного шва. При сварке плавлением применяют стыковое, нахлесточное, угловое и тавровое соединения. Также могут использоваться соединения прорезные, торцовые, с накладками и реже электрозаклепочные. [48]

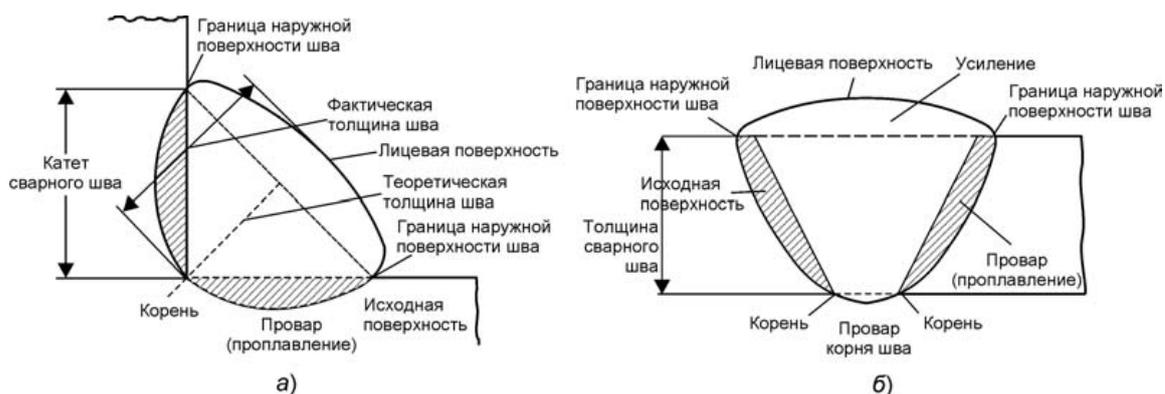


Рисунок 20 – Элементы сварки

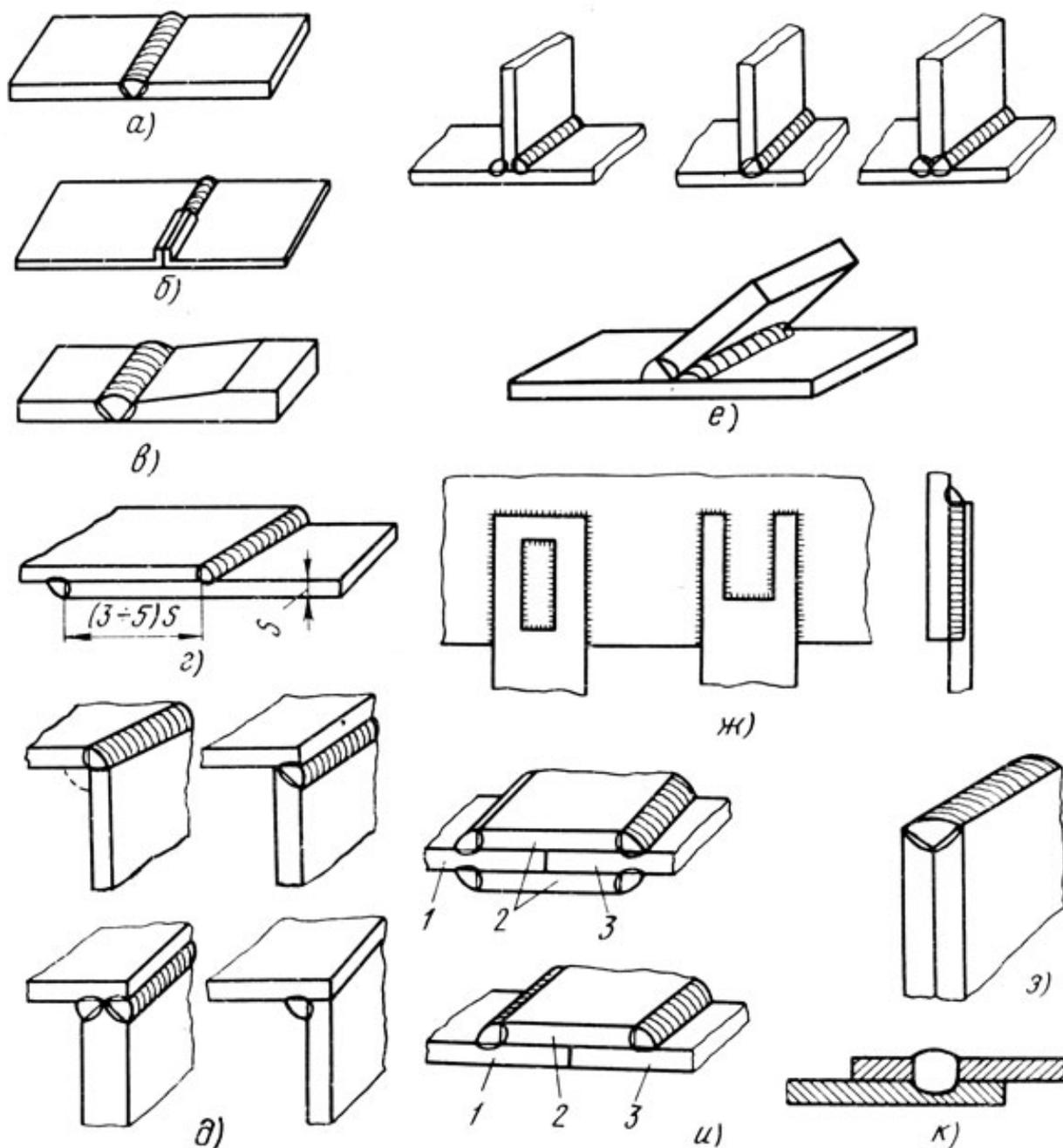


Рисунок 21—Основные виды сварных соединений: а - стыковые, б - стыковые с отбортовкой, в - стыковые листов разной толщины, г - нахлесточные, д - угловые, е - тавровые, ж - пререзные, з - торцовые, и - с накладками, к - электрозаклепочные; 1, 3 - свариваемые детали, 2 – накладки

«Присоединение элементов усиления производится обычно на сварке. В отношении величины сварных швов в существующих в настоящее время

работах нет достаточно общей точки зрения. В частности, в работах [9] отмечается, что для прикрепления усиливающих элементов необходимо применять сплошные сварные швы. Авторы работ [6] считают возможным в случае отсутствия опасности хрупкого разрушения применение прерывистых швов.»[34]

«Выбор схемы усиления определяется характером работы усиливаемых стержней. При усилении центрально сжатых и центрально растянутых стержней ферм следует стремиться к сохранению центровки, для чего центры тяжести усиленных сечений должны совпадать с центрами тяжести основных сечений или быть вблизи них. В случае сжатия необходимо также помнить о целесообразности увеличения изгибной жёсткости усиливаемых стержней.»[34]

«Отсюда при центральной сжатии наиболее рациональными будут схемы усиления, представленные на рис. 14, а, при центральном растяжении – схемы рис. 14, б.»[34]

«При усилении внецентренно сжатых и внецентренно растянутых стержней уменьшение величины эксцентриситета достигается присоединением элементов усиления таким образом, чтобы центры тяжести усиленных сечений были расположены по возможности ближе к точкам приложения сил. Характерные для этих случаев схемы усиления представлены на рис. 14 в.»[34]

Приёмы усиления стержней введением отдельных дополнительных элементов (узлов, стержней, накладок и т.д.) аналогичны приёмам, применяемым при усилении ферм изменением расчётных и конструктивных схем путём введения дополнительных элементов без изменения статических свойств. Примеры такого усиления показаны на рис. 7л, м.

«В стыковом соединении составляющие его элементы расположены в одной плоскости или на одной поверхности (рисунок 14, а-в). Оно наиболее распространено в сварных изделиях, так как имеет следующие преимущества перед остальными.»[34]

«Угловое соединение выполняется для двух элементов расположенных под углом 90^0 и сваренных в метлах примыкания краев (рисунок 21, д).»[34]

«Тавровое соединение - сварное соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под углом и приварен торцом другой элемент (рисунок 21,е), как правило, угол между элементами прямой.»[34]

«Угловые и тавровые соединения широко используются при сварке балок, колонн, стоек, каркасов, ферм и др., обеспечивая увеличение жесткости и уменьшение деформаций изделия.»[34]

Нахлесточное соединение—это соединение, где детали располагаются друг на друге с нахлестом. Швы чаще выполняют поперек элемента.

Прорезные соединения (рисунок 21, ж) применяются тогда, когда длина шва нахлесточного соединения не обеспечивает достаточной прочности.

Соединения с накладками (рисунок 21,и) используют в тех случаях, когда нету возможности выполнить стыковые или нахлесточные соединения для элементов.

Соединения электрозаклепками (рисунок 21,к) применяют очень редко в основном в нахлесточных и тавровых соединениях. При помощи электрозаклепок получают прочные соединения. [16]

Также необходима различная экипировка для сварщиков. Защитная экипировка мастера сварщика включает в себя костюм из особой ткани, ботинки, перчатки, защитную маску или щиток, закрывающий глаза и лицо. Таким образом, абсолютно все части тела оказываются закрыты от искр и брызг расплавленного металла. Все элементы костюма должны быть удобными и легкими, не ограничивающими движений и обзора. [49]



Рисунок 22 – Костюмы для сварщика

Костюмы для сварщиков (рисунок 22) изготавливаются из плотной ткани — парусины или брезента, а также из некоторых видов кожи. Материал пропитывается специальным огнезащитным составом; такие изделия имеют маркировку «Тр» и выдерживают прожигание в течение минимум 50 секунд (время, определенное требованиями ГОСТа).

Перчатки и краги для сварки изготавливаются примерно по той же технологии, что и костюмы. Помимо вышеобозначенных материалов, для них также широко применяется спилкок — особым образом выделанная кожа крупного рогатого скота. Этот материал с нанесенным на его поверхность огнестойким акриловым покрытием считается наиболее подходящим для изготовления защитных перчаток.

Техника безопасности также предъявляет весьма строгие требования к обуви для сварочных работ. Категорически запрещено использование обуви с

открытой шнуровкой или с подошвой подбитой металлическими гвоздями. Оптимальным вариантом считаются укороченные сапоги или кожаные ботинки с высоким голенищем, также снабженные маркировкой «Тр». [50]

Наконец, главный элемент сварочной экипировки — защитная маска для лица. Она защищает не только от искр и брызг расплавленного металла, но также от вредного для глаз излучения. Все маски различаются по типу светофильтра: этот элемент может находиться в фиксированном (неизменном) состоянии, откидываться по мере необходимости или регулироваться автоматически (фильтры такого типа называют «хамелеон» - они затемняются во время сварки и просветляются в перерывах).



Рисунок 23 – Защитная маска

Дополнительно маска может быть снабжена респиратором, системой вентиляции и другими дополнительными функциями, повышающими удобство пользования изделием. Сварочные маски изготавливаются из легкого и прочного пластика, в обязательном порядке имеют регулируемое оголовье, благодаря чему удобно сидят и не мешают работать.

Современные элементы одежды для сварщика должны отвечать требованию легкости, мягкости и негорючести. Соблюдая государственный стандарт, производители маркируют костюм, куртку и брюки пометкой «Тр». Она показывает, что перечисленные изделия защищают владельца от ожогов искрами и брызгами расплавленного металла. Это стало возможным благодаря

тому, что применяемые для изготовления материалы (парусина, кожа, брезент и так далее) пропитываются антипиреновыми веществами с целью повышения жаростойкости. [51]

1.6 Методики определения состояния стержней ферм, подвергаемых усилению методом увеличения сечения

«Наибольший интерес с точки зрения дальнейшего исследования состояния усиливаемых увеличением стержней ферм представляют собой работы Б.И.Десятова, И.С.Реброва, В.М.Колесникова, И.К.Родионов.»[34]

«Вопросы устойчивости сжатых стержней ферм усиливаемых под нагрузкой был впервые рассмотрены В.М.Колесниковым. Автором был проведен анализ методики расчета, представленным в проекте «Указания по 43 проектированию усилений стальных конструкций зданий и промышленных сооружений». Рекомендации написанные в отношении сжатых стержней допускали производить усиление при нагрузках, вызывающих расчетные усилия в усиливаемых элементах, не превышающие их несущую способность. В отношении сжатых стержней «Указания...» рекомендовали производить их усиление при нагрузках, вызывающих расчётные усилия в усиливаемых элементах, не превышающие их расчетную несущую способность (формула 2, табл.1). Причём усиление разрешалось выполнять без разгрузки конструкций при условии, определяемом формулой (3) (таблица 1). Проверку устойчивости усиленных стержней предлагалось производить по формуле (1) (таблица1).»[34]

Таблица 1 – Существующие методики расчета усиливаемых сжатых стержней ферм

Авторы методик расчета	Условия устойчивости центрально и внецентренно сжатых стержней, усиленных под нагрузкой	Величины предельно допустимых при усилении усилий (из условия устойчивости)	
		Для центрально сжатых стержней	Для внецентренно сжатых стержней
Проектсталь-конструкция, проект “Указаний...” [218]	$\frac{N_0^y}{F_0 \varphi_0} + \frac{N_d}{(F_0 + F_y) \varphi_{об}} \leq mR \quad (1)$	$N_0^o \leq m \varphi_0 R F_0 \quad (2)$ при $\varphi_{iá} \geq \varphi_0 \quad (3)$	
Колесников В.М.	$\frac{N_0^y + N_d}{(F_0 + F_y) \varphi_{об}} \leq mR \quad (4)$	$N_0^o \leq 0,8 m \varphi_0 R F_0 \quad (5)$	
Десятов Б.И.	$\frac{N}{\varphi_{áí}^o F} \leq mR \quad (6)$	$N_0^o \leq 0,6 m \varphi_0 R F_0 \quad (7)$	$N_0^o \leq 0,6 m \varphi_{áí}^i R F_0 \quad (8)$
Ребров И.С.	$\frac{N}{\varphi_{áí}^o F} \leq m m_1 R, \quad (9)$ $m_1 = 0,9 \quad (1,0)$	$N_0^o \leq m \varphi_0 R F_0 \quad (10)$	$N_0^o \leq m \varphi_{áí}^i R F_0 \quad (11)$

Здесь в формулах (1 – 3) (таблица 1) приняты следующие обозначения:

N_0^y – усилие в стержне в момент усиления;

N_d – приращение усилия в стержне после усиления;

R – расчётное сопротивление материала на сжатие, растяжение, изгиб, определенное по пределу текучести;

φ_0 – минимальный коэффициент продольного изгиба центрально сжатого стержня до его усиления;

$\varphi_{об}$ – минимальный коэффициент продольного изгиба центрально сжатого стержня после усиления;

F_0, F_y – площадь сечения соответственно основного стержня и элементов усиления;

m – коэффициент условий работы усиливаемого стержня.

Данная методика имела следующие недостатки: работа старого и нового металла после усиления и добавления нагрузки рассматривалась отдельно, не учитывалось перераспределение напряжений в элементах, полностью отсутствовал какой-либо учёт влияния сварки на работу усиливаемых и усиленных стержней.

«В.М.Колесников исследовал совместную работу основных и усиливающих элементов при дальнейшем после усиления увеличении нагрузки. Анализ совместной работы основных и дополнительных элементов был положен в основу предложенной автором [14] методики расчёта усиленных под нагрузкой сжатых стержней, в соответствии с которой проверку устойчивости усиленных элементов следует производить по формуле (4) (табл.1). Нагрузки, действующие при усилении, автор предложил ограничить величинами, при которых усилия в усиливаемых стержнях не превосходят значений, равных 0,8 от расчётных величин несущей способности (формула 5, табл.1), аргументируя это неравномерным разогревом основного элемента, вызывающим продольный изгиб.»[34]

Работы В.М.Колесникова являлись несомненно шагом вперёд в исследовании напряженного состояния усиливаемых под нагрузкой сжатых элементов, однако в них не рассматривались такие вопросы, как:

влияние величин нагрузок, действующих в момент усиления, на несущую способность усиленных стержней;

влияние производимого усиления отдельных стержней на работу остальных элементов ферм.

В.М. Колесниковым был исследован вопрос влияние сварки. Отсутствие исследований влияния технологических параметров сварочного процесса делает умозрительным принятие автором в формуле (5) (табл. 1) коэффициента 0,8, ограничивающего величину предельно допустимой при усилении нагрузки.

«Б.И. Десятовым [9] были исследованы вопросы, связанные с усилением под нагрузкой сжатых и растянутых элементов ферм, а также узловых прикреплений этих элементов увеличением длины сварных швов. В работах

было подтверждено перераспределение напряжений в сечении усиленного элемента при дальнейшем после усиления увеличении нагрузки, произведена оценка влияния величин нагрузок, действующих в момент усиления, и эксцентриситетов, появляющихся в результате усиления, на несущую способность усиленных стержней.»[34]

«Совместно с А.Г. Иммерманом автором [9] была разработана методика расчёта несущей способности сжатых и растянутых, усиленных под нагрузкой стержней, вошедшая в «Рекомендации по усилению сварных стальных ферм под нагрузкой». Согласно [9] проверка устойчивости сжатых усиленных стержней ведётся по формуле (6) (табл. 1), где ϕ_{ai}^0 – минимальный коэффициент продольного изгиба усиленного стержня; F – площадь усиленного сечения.»[34]

«Данная методика расчёта более точно отражает действительную работу усиленного элемента; в частности, она позволяет учесть возможность отрицательного влияния сварочного процесса, выражающегося в увеличении имеющихся эксцентриситетов и, таким образом, уменьшении величин критических сил.»[34]

Следует, однако, отметить, что учёт только отрицательного влияния сварки является односторонним подходом к вопросу влияния сварочных деформаций.

Б.И. Десятовым в [9] был поставлен и вопрос о порядке наложения сварных швов по длине усиливаемых стержней при присоединении элементов усиления. Автор [9] рекомендует в качестве оптимального порядка сварки порядок с наложением сварных швов от концов к середине. Однако в «Рекомендациях...» [9], разработанных Б.И.Десятовым совместно с А.Г.Иммерманом, предлагается, как «способ уравнивания деформаций», качественно иной порядок сварки: от середины к концам. Вопросы влияния протяжённости и катетов сварных швов, последовательности их наложения по сечению на напряжённое состояние как сжатых, так и растянутых стержней

(формоизменение, напряжения в сечениях, тепловое ослабление сечений) в [9] не рассматривались.

«Сварка непременно, уже в момент усиления, влияет на работу усиливаемых стержней. В этой связи очевидно, что отсутствие в [9] исследований влияния сварочного процесса на работу усиливаемых элементов делает необоснованными выводы о предельно допускаемых при усилении нагрузках, которые авторы предлагают ограничить величинами, равными 0,6 от предельных расчётных величин для усиливаемых сжатых (формулы 7, 8, табл.1) и растянутых элементов.»[34]

В ходе экспериментальных исследований работы сжатых, подвергаемых усилению образцов, проводимых автором [9], имел место случай интенсивного нарастания прогиба и потери устойчивости усиливаемого стержня ($\lambda_0=75$) непосредственно в процессе наложения связующих швов, что объяснялось чрезмерным разогревом образца «в результате наложения последующего сварного шва без остывания предыдущего». В связи с этим при испытании остальных образцов в [9] на время наложения сварных швов и их остывания в средних по длине сечениях устанавливались распорки, уменьшающие вдвое гибкость стержней и препятствующие нарастанию прогибов в процессе сварки.

«В работе с усилением под нагрузкой сжатых элементов ферм И.К. Родионовым [29-33, 52] были выполнены теоретические исследования влияния сварочных режимов технологий на состояние нагруженных стержней стальных ферм. Еще автором получены критерии определения предельных уровней напряжений сжатия в стержневых элементах ферм, при которых возможно их усиление с применением сварки.»[34]

«Действующие при усилении нагрузки, В.М. Колесников предложил ограничить величинами, при которых усилия в усиливаемых стержнях не превосходят значений равных 0,8 от расчетных величин несущей нагрузки.»[34]

«Связанные с усилением под нагрузкой сжатых элементов ферм, а также узловых прикреплений этих элементов увеличением длины сварных швов были

проведены исследования Б.И. Десятовым.[9] Автором была произведена оценка влияния нагрузок, действующих в момент усиления, и эксцентриситетов, появляющихся в результате усиления на несущую способность усиленных стержней. Также было подтверждено перераспределении напряжений в сечении усиленного элемента при дальнейшем после усиления увеличении нагрузки.»[34]

«Сварка, уже в момент усиления, влияет на работу усиливаемых стержней. В этой связи очевидно, что отсутствие в [9] исследований влияния сварки на работу усиливаемых стержней делает необоснованными выводы о предельно допускаемых при усилении нагрузках, которые авторы предлагают ограничить величинами, равными 0,5 от предельных расчётных величин для усиливаемых сжатых стержней.»[34]

В отношении величин предельно допускаемых при усилении усилий – самые разнообразные точки зрения. В частности, эти величины ограничиваются значениями, равными 0,5 и 0,4, 0,6 и 0,4 от расчётной несущей способности стержней соответственно при центральном и внецентренном растяжении, центральном и внецентренном сжатии. Авторы предлагают ограничить предельно допускаемые величины усилий при усилении центрально сжатых стержней значениями, равными 0,6 от расчётной несущей способности. В [9] считают возможным ограничить величины предельно допустимых усилий значениями, равными 0,8 от расчётной несущей способности практически для всех напряжённых состояний (центрального и внецентренного сжатия, центрального и внецентренного растяжения).

«Ребровым И.С. [23] приведены результаты расчетного (с помощью программного комплекса RUSS) анализа особенностей работы усиливаемых стержневых конструкций. Автор делает вывод о факте увеличения прогибов ферм при усилении их сжатых поясов. Этот, теоретически полученный, результат не подтверждается автором экспериментально, на конструкции. Результаты же испытаний фермы подтверждают обратное: и при усилении

сжатых стержней решетки, и при усилении сжатого пояса общие деформации усиливаемой конструкции, её прогибы, не имеют место.»[23]

Автор [23] отмечает, что «при несимметричных схемах усиления вследствие смещения центров тяжести сечений сварочные деформации могут играть как положительную, так и отрицательную роль в зависимости от соотношений знаков и величин начальных и результирующих эксцентриситетов». Вывод не находит в [23] выход на конкретные технологические схемы, позволяющие улучшать работу стержней ферм в процессе усиления и особенно усиленных.

«На основании исследований Ребровым И.С. [23] предложена методика расчёта устойчивости усиленных сжатых элементов. В ней сделана попытка учёта отрицательного влияния остаточных сварочных прогибов на работу стержней после усиления: прогибы от сварки учитывались лишь как увеличивающие имеющиеся в сжатых элементах эксцентриситеты. Для расчёта сварочных прогибов предлагалась известная методика, не учитывающая специфику работы усиливаемых стержней, в частности, наличие в них сжимающих напряжений от нагрузки.

Автором [23-27] выполнены довольно значительные по объёму экспериментальные исследования: на стержневых моделях и натуральных стержнях. Определённое внимание в них было уделено вопросам технологии проведения усиления (сварки). В процессе эксперимента усиливающие элементы присоединялись к основным стержням сплошными швами по концам и прерывистыми (с коэффициентом прерывистости 0,2–0,3) в промежутках. Порядок наплавки принимался в направлении снизу вверх: нижние сплошные, затем связующие прерывистые и последними – сплошные верхние, концевые. То есть, экспериментально рассматривалась лишь одна из возможных технологических схем. [22]

В [24] И.С.Ребровым сделан вывод о возможности «проведения усиления сжатых стержней при начальной нагрузке, не превышающей наименьшую расчётную критическую для сжатого стержня без введения дополнительных

коэффициентов». Такой вывод в данном случае некорректен. Величина этой нагрузки в значительной степени зависит от технологических параметров усиления (сварки): величины сварных швов, порядка их наплавки как по длине, так и по сечению. Теоретически и экспериментально эти вопросы автором [23-26] не исследовались.» [9]

«Некорректность в данном случае такого вывода отмечена и научным редактором [15], профессором, д.т.н. М.И.Лашенко, подчеркнувшим в редакционном примечании, что «с мнением автора о предельно допустимой нагрузке согласиться нельзя. При достижении в основном (усиливаемом) стержне нагрузки, отвечающей её критическому значению, потеря устойчивости может произойти в момент усиления.»[34]

В каждом из источников даётся объяснение понижающих коэффициентов. В частности, в [23] – возможностью при более высоких значениях усилий потери устойчивости сжатых стержней в момент их усиления «в результате нагрева и появления значительных прогибов». В [9] авторы, ограничивая предельные усилия при усилении сжатых и растянутых стержней величинами, равными 0,8 от расчётной несущей способности, объясняют, что это достаточно, учитывая то, что «...доля временной нагрузки обычно превышает 20%» и, таким образом, можно избежать разгрузки конструкций на период усиления от постоянной нагрузки.

Рассматривая работы Десятова Б.И., вопросы влияния производимого усиления отдельных стержней на работу остальных элементов фермы не рассматривались, как и на работу усиливаемой конструкции в целом.

Также не подвергался экспериментальному исследованию вопрос о работе сжатых стержней, усиливаемых в составе ферм.

Таким образом, разброс коэффициентов «понижения» предельного уровня допускаемых нагрузок усиления велик: практически от 0,4 до 1,0.

Выводы по первой главе:

Основываясь на различных данных обзораемых в источниках, в магистерской диссертации было решено выяснить влияние начальной нагрузки

на результат усиления центрально сжатого стержня. Усиление наиболее часто производится увеличением сечения с применением сварки. В данной работе будет использована ручная дуговая сварка.

Суть метода заключается в проверке стержня, усиленного без нагрузки, и стержня, усиленного под нагрузкой равной примерно половине от критической и 0,8 от критической.

Таким образом можно утверждать о новизне магистерской диссертации, а также ее актуальности в связи с широким использованием металлических конструкций в современном строительстве.

2 Экспериментальное исследование работы сжатых стержней, усиливаемых с применением сварки

2.1 Методика проведения испытаний

Цель данного исследования – получить информацию о влиянии нагрузки усиления на несущую способность усиленных стержней методом увеличения сечения.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- 1) Испытание стержней эталонных стержней.
- 2) Испытание стержней, усиливаемых без нагрузки
- 3) Испытание стержней, усиливаемых под нагрузкой
- 4) Анализ полученной информации

Стержни из уголков L40x4 [8] для проведения эксперимента были изготовлены на заводе металлоконструкций.

Для испытаний изготовлены 12 стержней длиной 1000 мм из двух уголков, составленных в тавр.

В опорной части стержня между уголками расположены пластины толщиной 18 мм с углублением с одной стороны под металлическую шаровую опору. Верхняя и нижняя опора показаны на рисунках 24 и 25. Промежуточные соединительные пластины выполнены из пластин толщиной 16 мм.



Рисунок 24 – Верхняя шаровая опора



Рисунок 25 – Нижняя шаровая опора



Рисунок 26 – Шкала прессы

В качестве элементов усиления были подготовлены уголки L40x4 длиной L=1000 мм.

Стержни для эксперимента изготавливались согласно рабочим чертежам и спецификации. Чертежи и спецификации приведены на рисунке 24 и таблица 1, 2.

В сертификате на металл с завода изготовителя прописана марка стали для всех элементов Ст3сп (С245). На рисунке 27 показаны чертежи для изготовления экспериментальных стержней.

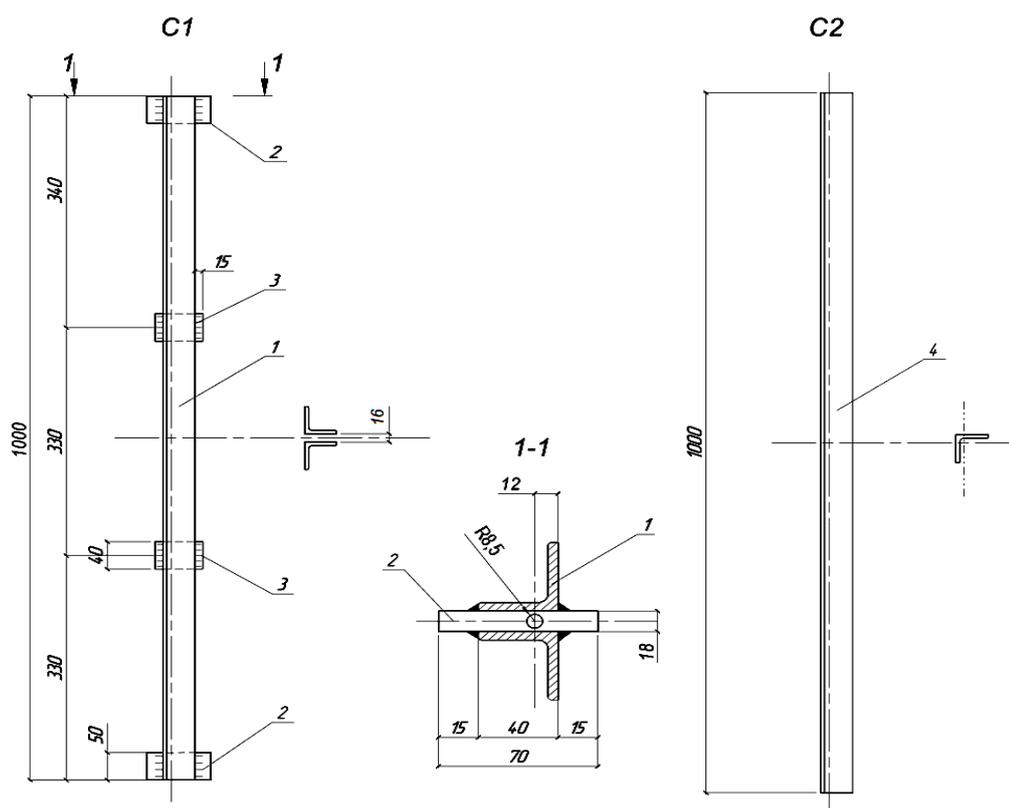


Рисунок 27 – Марки С1, С2

Таблица 2–Спецификация металла. Сталь класса С245

Отправочная марка	№ поз	Кол-во		Сечение, мм	Длина, мм	Масса, кг			Примечание
		Т	Н			шт.	всех	марки	
С1	1	2	-	L40x4	1000	2,5	5	8	Св.
	2	2	-	- 50x18	70	0,5	1		
	3	2	-	- 40x16	70	0,4	1		
	На свар. швы, 1%						1		
С2	4	1	-	L40x4	1000	2,5	3	3	

Таблица 3– Количество отправочных марок

Отправочная марка	Кол-во		Масса, кг		Примеч.
	Т	Н	шт.	всех	
С1	12	-	8	96	
С2	18	-	3	54	

На рис. 28– показаны заготовки деталей необходимые для изготовления опытных образцов.



Рисунок 28 – Заготовки для изготовления экспериментальных стержней

Сборка марки С1 осуществлялась в следующем порядке:

- 1) в пластинах 50x18 предварительно выполняется небольшое углубление диаметром 17 мм под шаровую опору;
- 2) сварка уголков 2L40x4 с опорными пластинами сечением - 50x18;
- 3) прикрепление струбцинами и приварка соединительных прокладок сечением - 40x16;

Сварка элементов производилась электродами Э46 с катетом 4мм.

Всего эксперимент включает 4 серии. В каждой серии будут испытываться 3 стержня (таблица 2):

- 1) эталонные стержни;
- 2) стержни, усиленные уголками без нагрузки;
- 3) стержни, усиленные уголками под нагрузкой равной примерно $0,5N_{min}^{cr}$;
- 4) стержни, усиленные уголками под нагрузкой равной примерно $0,8N_{min}^{cr}$;

Таблица 4 –Нагрузки усиления

Серия	Номер стержня	Характер нагружения	Нагрузка усиления	Наличие усиления	Элементы усиления							
1	1	Центральное сжатие	–	нет	нет							
	2											
	3											
2	4		Центральное сжатие	0	есть	2 L40x4						
	5											
	6											
3	7			Центральное сжатие			$0.5N_{min}^{cr}$	есть	2 L40x4			
	8											
	9											
4	10						Центральное сжатие			$0.8N_{min}^{cr}$	есть	2 L40x4
	11											
	12											

Все стержни были разделены на 4 серии по 3 шт. в каждой серии (табл. 2). Стержни 1-й серии будут испытываться без усиления. Стержни 2-й, 3-й и 4-й будут подвергаться усилению. Нагрузки усиления представлены в тал. 3.

Стержни были испытаны на гидравлическом прессе П-200. Опоры прессы шарнирные (рис. 29, 30), предварительно отцентрированные. Рисунок 26 Шкала прессы.

Испытания стержней 1-й серии будут проводиться в следующем порядке:

- 1) Установка стержня между опорами (рисунок 26).
- 2) Нагружение ступенями в 200 кг до потери устойчивости.
- 3). Фиксирование критической нагрузки.

Порядок испытания стержней 2 будет отличаться: Стержень будет усиливаться без нагрузки, затем устанавливаться между опорами и нагружаться до критической нагрузки.

Испытание стержней 3-й и 4-й серий будут проводиться в следующем порядке:

- 1) Установка стержня между опорами (рисунок 29).
- 2) Нагружение до нагрузки усиления.
- 3) Прикрепление элементов усиления швами минимальных размеров в 2-х сечениях по концам в пределах опорных пластин и в 2-х промежуточных сечениях (рисунок 31).
- 4) Остывание стержней.
- 5) Нагружение до потери устойчивости.
- 6) Определение критической нагрузки по шкале прессы.



Рисунок 29 – Испытание эталонных стержней



Рисунок 30 – Усиленный стержень



Рисунок 31 – Усиление 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» [13].

«Оборудование для сварочных работ должно соответствовать ГОСТ 12.2.003-74 и ГОСТ 12.2.049-80» [13].

«Не допускается проведение сварки при неработающей местной вытяжной вентиляции» [13].

«Помещения для проведения электросварочных работ должны отвечать требованиям действующих строительных норм и правил, санитарных норм проектирования промышленных предприятий*, утвержденных Госстроем СССР и правил устройства электроустановок» [13].

«Допуск к сварочным работам должен осуществляться после того, как была изучена проектная документация» [13].

«Подключение и отключение сварочного оборудования должно происходить в присутствии электротехнического персонала» [13].

«К выполнению сварочных работ допускаются лица, которые прошли инструктаж по технике безопасности и проверку знаний, а так же имеют соответствующие удостоверения» [13].

«Лицо, выполняющее сварочные работы должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты. Необходима периодическая обработка средств индивидуальной защиты» [13].

2.3 Техника безопасности при работе с гидравлическим прессом

Нужно соблюдать технику безопасности при работе с гидравлическим прессом. Ниже представлены некоторые правила по технике безопасности:

У гидравлического пресса всегда должен работать ограничитель, во избежание несчастных случаев. Его используют для предотвращения падения.

Перед началом работ нужно надеть спецодежду. По мимо спецодежды необходимо надевать защитные очки, которые не должны содержать повреждения.

Ничего не должно мешать передвижению около рабочего места, все проходы должны быть освобождены от мешающихся предметов.

Все кнопки на гидравлическом прессе должны быть исправны.

Ниже представлена техника безопасности во время работы:

Во время проведения любых испытаний посторонних лиц не должны быть рядом с гидравлическим прессом во избежание несчастных случаев.

Любые замены деталей на гидравлическом прессе должны выполняться специалистами.

После окончания испытания необходимо отключить оборудование, убрать рабочее место.

2.4 Анализ результатов испытаний

Проведённые испытания показало близкие значения при разных нагрузках усиления: все стержни теряли несущую способность с элементами упругопластических деформаций.

На рисунке 32 представлена фотография потерявшего устойчивость стержня серии 1; на рисунке 33 показан усиленный стержень, потерявший устойчивость.

Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Таблица 5–Результаты испытания

Серия	Номер стержня	Характер нагружения	Нагрузка усиления	Нагрузка разрушения	Наличие усиления	Элементы усиления	
1	1	Центральное сжатие	–	10500	нет	нет	
	2			10000			
	3			10500			
2	4		0		22000		
	5				23750		
	6				24500		
3	7		4т		24500	есть	2 L40x4
	8				24000		
	9				24500		
4	10		6,25т		22500		
	11				23250		
	12				23750		

Критические силы стержней по сериям имеют довольно небольшой разброс:

- центрально сжатые стержни серии 1 – 105, 100, 105 кН;
- усиленные длинными элементами стержни серии 2 – 220, 237,5, 245 кН;
- усиленные длинными элементами стержни серии 3 – 245, 240, 245 кН.
- усиленные длинными элементами стержни серии 4 – 225, 232,5, 237,5 кН.



Рисунок 32 – Деформации эталонного стержня



Рисунок 33 – Потерявший устойчивость стержень серии 3

В целом, проведённые экспериментальные исследования дали возможность понять и проанализировать работу сжатых, усиливаемых под разной нагрузкой, стержней.

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 уголков методом увеличения сечения является эффективным.

3) Влияние нагрузки по результатам испытания получается незначительным.

3 Теоретическое обоснование эксперимента

3.1 Расчёт несущей способности эталонного стержня

Расчет эталонного стержня производился согласно СП 16.13330.2017 [26, 38] как для центрально сжатого. Стержень с двух сторон имеет шарнирное закрепление. Расчетная схема сжатого стержня показана ниже на рисунке 34. [21]

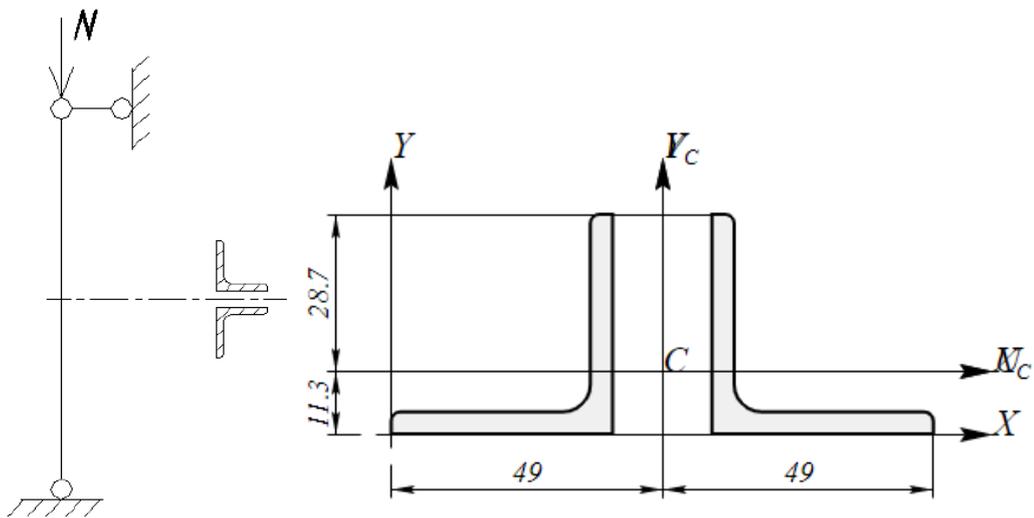


Рисунок 34 – Расчетная схема эталонного стержня

Главные характеристики эталонного стержня, который имеет сечение тавра из двух уголков L40x4:

- площадь поперечного сечения для двух уголков: $A=6,16 \text{ см}^2$;
- радиус инерции относительно оси x : $i_x=1,22 \text{ см}$;
- радиус инерции относительно оси y : $i_y=1,8 \text{ см}$;
- расчетная длина составляет: $L=1000 \text{ мм}$;

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

Результаты расчета представлены ниже:

Гибкость в плоскости перпендикулярной оси x:

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

Гибкость в плоскости перпендикулярной оси y:

$$\lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{100}{1,8} = 55,6;$$

Приведенная гибкость:

$$\lambda_{\bar{x}} = \lambda_{max} \sqrt{\frac{\sigma_T}{E}} = 82 \sqrt{\frac{31,5}{2,1 \cdot 10^4}} = 3,17$$

Коэффициент продольного изгиба определяется с помощью таблицы Д1 для сечения «с» $\varphi = 0,532$.

Несущая способность будет
равна: $[N] = \varphi \cdot A \cdot \sigma_T = 0,532 \cdot 6,16 \cdot 31,5 = 103$ кН.

По результатам испытания критические силы у стержней получились: $N_1=105$ кН, $N_2=93$ кН, $N_3=105$ кН. Полученные результаты имеют незначительное расхождение с теоретическим. Можно сделать вывод о достоверности полученных результатах.

3.2 Расчет несущей способности усиленных стержней

Расчетная схема стержня, усиленного стержня уголками L40x4 представлена на рисунке 35. [39]

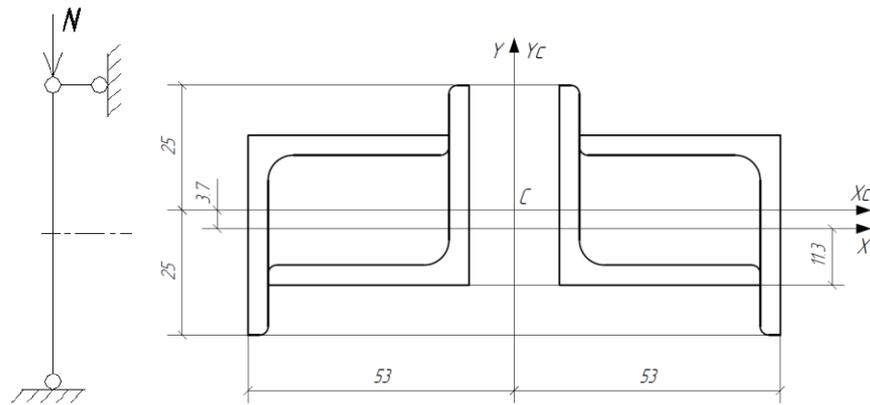


Рисунок 35 – Расчетная схема стержня, усиленного стержня

- площадь поперечного сечения для четырех уголков: $A=12,32 \text{ см}^2$;
- радиус инерции относительно оси x : $i_x=1,27 \text{ см}$;
- радиус инерции относительно оси y : $i_y=3,5 \text{ см}$;
- расчетная длина составляет: $L=1000 \text{ мм}$;
- эксцентриситет равен: $0,37 \text{ см}$

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

Результаты расчета представлены ниже:

Гибкость в плоскости перпендикулярной оси x :

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{100}{1,27} = 78,74;$$

Гибкость в плоскости перпендикулярной оси y :

$$\lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{100}{3,5} = 28,57;$$

приведенная гибкость:

$$\lambda_{\bar{x}} = \lambda_{\max} \sqrt{\frac{\sigma_T}{E}} = 78,74 \sqrt{\frac{31,5}{2,1 \cdot 10^4}} = 3,05$$

$$m_x = \frac{e_x \cdot A}{W_x} = \frac{0,37 \cdot 12,32}{8} = 0,57;$$

$$\eta = (0,5 + 0,1 \cdot m) + 0,02 \cdot (5 - m) \cdot \lambda_x^- = (0,5 + 0,1 \cdot 0,57) + 0,02 \cdot (5 - 0,57) \cdot 3,05 = 0,83$$

;

$$m_{ef} = \eta \cdot m_x = 0,57 \cdot 0,83 = 0,47$$

коэффициент продольного изгиба определяется по таблице Д3 для $m_{ef} = 0,47$ $\lambda_x^- = 3,05$ $\varphi = 0,522$

Несущая способность стержня:
 $[N] = \varphi \cdot A \cdot \sigma_T = 0,522 \cdot 12,32 \cdot 31,5 = 202 \text{ кН}$.

Несущие способности, полученные экспериментальным путем и теоретическим, сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Теоретические и экспериментальные результаты

Серия	Тип усиления	Несущая способность, кН	
		Экспериментальная	Теоретическая
Серия 1	нет	105, 93, 105	103
Серия 2	2 L 40x4	220, 237,5, 250	202
Серия 3	2 L 40x4	245, 262,5, 245	202
Серия 4	2 L 40x4	225, 212,5, 237,5	202

По результатам можно сделать вывод, что полученные результаты близки к теоретическим. Следовательно, при расчетах в реконструкции нагрузку от

усиления в расчете можно не учитывать, и рассчитывать центрально сжатые стержни как обычно по СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции».

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

В данной работе рассмотрены и решены следующие задачи:

- 1) Проведен анализ дефектов и аварий стальных ферм покрытия производственных зданий;
- 2) Проведен анализ существующих методов усиления сжатых стальных стержней;
- 3) Рассмотрена ручная дуговая сварка, применяемая для усиления центрально-сжатых стержней
- 4) Проведены экспериментальные исследования центрально-сжатых стержней из парных уголков, усиливаемых под нагрузкой методом увеличения сечения;
- 5) Проведен анализ и теоретические обоснования полученных экспериментальных результатов;
- 6) Сравнение значений, полученных экспериментальным путем и теоретическим.

В результате проведенных экспериментальных исследований и теоретических обоснований были получены следующие результаты и сделаны выводы:

- 1) Результаты исследования показывают, что нагрузка, которая действует на элемент при усилении, незначительно влияет на несущую способность центрально сжатого стержня после усиления.
- 2) Усиление центрально сжатых стержней эффективно производить методом увеличения сечения.
- 3) Элемент усиления должен быть выполнен на всю длину усиливаемого элемента.
- 4) При усилении отдельных, центрально-сжатых стержней ферм выполнять расчет можно без учета нагрузки, действующей на элемент, по нормам СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» расчет центрально сжатых

ЭЛЕМЕНТОВ.

Список используемой литературы

1. Абрашитов В. С., Арискин М. В., Алмаметов Э. Х. Аварии металлических конструкций в Пензе // Молодой ученый. — 2015. — №9. — С. 137-139. — URL <https://moluch.ru/archive/89/18235/> (дата обращения: 25.12.2019).
2. Аугустин Я. Аварии стальных конструкций/Аугустин Я., Шледзевский Е. – М.: Стройиздат, 1978. –135 с.
3. 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, с.280–376.
4. Бельский М.Р. Усиление стальных конструкций/Бельский М.Р., Лебедев А.И. – Киев: “Будівельник”, 1981. –120 с.
5. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения Текст. / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. — М.: Стройиздат, 1968. –206 с.
6. Валь В.Н. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции/Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. – М.: Стройиздат, 1987. –220 с.
7. ГОСТ 12.3.003-86 «Работы электросварочные. Техника безопасности» / Госстрой СССР Текст М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 год.
8. ГОСТ 8509-93 Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент М.: Стандартиформ, 2012 год, 16 с.

9. Десятов Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм. Автореф. дисс. канд. техн. Наук/ Десятов Б.И. – М.: МИСИ, 1968.

10. Дмитриев Ф.Д. Крушение инженерных сооружений/ Дмитриев Ф.Д. – М.: Стройиздат, 1953. –140 с.

11. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление восстановление и ремонт/ Иванов Ю.В. – М.: АСВ, 2012. –312 с.

12. 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.

13. 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.:

14. Колесников, В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой Текст. / В. М. Колесников. Автореферат дис. . канд. техн. наук. - Л., 1967. - 24 с.

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

16. 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.

17. Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. - Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Атлас схем и чертежей, Томск 1990.

18. 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.

19. Металлические конструкции: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / [Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева и др.]; под ред. Ю.И. Кудишина. – 10-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 688 с.

20. Мизюмский И.А. Аварии и крушения стальных конструкций и исследование причин разрушения сварных стыков уголков. Кандидатская диссер-тация/ Мизюмский И.А., —ЛИСИ, 1959.

21. 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>. — Загл. с экрана.

22. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций / Укрнии-проектстальконструкция.-М.: Стройиздат, 1989

23. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций. (Методы расчета, анализ работы конструкций, проектирование усиления) Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. ЛИСИ, 1988, с. 5–7, 10–13, 21–23, 27–32, 36, 37.

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

25. Ребров И.С. Устойчивость центрально сжатого стержня, несимметрично усиленного под нагрузкой. В кн. «Инженерные конструкции». Доклады XXУ науч.–техн. конф. ЛИСИ, 1967.

26. Ребров И.С. Устойчивость центрально сжатого стержня, симметрично усиленного под нагрузкой. В кн. «Инженерные конструкции». Доклады XXIУ науч.–техн. конф. ЛИСИ, 1966.

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

28. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений. – Москва «Стройиздат», 1989.

29. Родионов И.К. К вопросу об оптимальной технологии усиления сжатых стержней уголковых 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.

30. 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.

31. Родионов И.К. Об экспериментальном исследовании стальной фермы, усиливаемой под нагрузкой с применением сварки. «Вектор науки Тольяттинского государственного университета», 2015.

32. 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.

33. Родионов И.К. Усиление сжатых стержней стальных ферм производственных зданий. «Сварочное производство» №4, 2009, с. 25-29.

34. Руководство по усилению элементов металлоконструкций с применением сварки. ЦНИИпроектстальконструкция. М.: 1979, 15 с.

35. Сахновский М.М. Уроки аварий стальных конструкций/ Сахновский М.М., Титов А.М. —Киев: Буд1вельник, 1969, —200 с.

36. СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*" (с Поправкой, с Изменением N 1)

37. Сварка строительных металлических конструкций [Электронный ресурс] : Учебное пособие / Ибрагимов А.М., Парлашкевич В.С. - М. : Издательство АСВ, 2015.

38. СП 13102–2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений», М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2004
39. СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*" (с Поправкой, с Изменением N 1) / Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2017 - 148 с.
40. Стрелецкий Н.С. Работа сжатых стоек/ Стрелецкий Н.С. — Госстройиз-дат, 1959.
41. Уроки аварий стальных конструкций. Сахновский М.М., Титов А.М. 1969
42. Шкинев А.Н. Аварии в строительстве. - 4-е изд., перераб. и доп./ Шкинев А.Н. - М.: Стройиздат, 1984.
43. Ясинский Ф.С. Избранные работы по устойчивости сжатых стержней/ Ясинский Ф.С. - Л.: Гостехиздат, 1952. - 428 с
44. Ибрагимов А.М. Сварка строительных металлических конструкций: Учебное пособие / Ибрагимов А.М., Парлашкевич В.С. - М. : Издатель-ство АСВ, 2015.
45. Al-Sulaimani, G.J., M. Kaleemullah, I.A. Basunbul and Rasheeduzzafar, 1990. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. Struct. J., 87(2): 220-231.
46. 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.
47. Bazant, Z.P., 1979. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-theory. J. Struct. Div., 105(6): 1137-1153.
48. 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.
49. 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.

50. Corrosive wear forecasting of steel elements on the basis of mathematical modeling methods, authors: Soloviev Alexey, Rybakova Larisa, Kostakova Olga, Издательство: EDP Sciences.

51. Experimental Testing of a Small-Scale Truss Beam That Adapts to Loads Through Large Shape Changes, authors: Arka P. Reksowardojo, Gennaro Senatore, Ian F. C. Smith, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2019.00093/full>

52. Optimal design of lattice metal constructions of overhead power transmission lines, authors: Pustovgar A., Shilova L., Adamtsevich A., Tanasoglo A., Garanzha I., Издательство: EDP Sciences.

53. Rodionov I.K. Reinforcement of compressed bars of steel girders in industrial buildings. Welding International. 2010. T 24. № 11.

54. Study of the mineral structure of the oral fluid in patients with chronic diseases of the salivary glands using different fixed dentures, Atmazhov I.D., Издательство: Journal of Health Sciences Radomska Szkoła Wyższa w Radomiu.