

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Архитектурно-строительный институт
Кафедра «Городское строительство и хозяйство»

08.04.01 «Строительство»
направленность (профиль) «Техническая эксплуатация и
реконструкция зданий и сооружений»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Исследование напряженного состояния усиливаемых с применением
сварки деформированных сжатых стержней

Студент	<u>А.В. Бамбуров</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>И.К. Родионов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., проф., В.А. Ерышев
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« ____ » _____ 20 ____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доц., Д.С. Тошин
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) _____ (личная подпись)
« ____ » _____ 20 ____ г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ..	6
1.1 Систематизация дефектов и аварий стальных ферм покрытия производственных зданий	6
1.1.2 Дефекты стропильных ферм при монтаже конструкции	9
1.1.3 Влияние различных причин и факторов ухудшающих работу элементов конструкции стропильной фермы при ее эксплуатации	11
1.2 Анализ аварий стальных конструкций производственных зданий	15
1.2.1 Классификация аварий стальных конструкций	15
1.2.2 Причины аварий металлических конструкций	17
1.2.3 Примеры аварий стальных конструкций	29
1.3 Анализ существующих методов усиления сжатых стержней ферм	36
1.3.1 Существующие методики определения напряжённо–деформированного состояния стержней ферм, подвергаемых усилению методом увеличения сечения.....	42
1.4 Вывод по разделу 1	50
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖАТЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СТЕРЖНЕЙ, УСИЛИВАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРКИ.....	51
2.1 Методики проведения испытаний сжатых стержней.....	51
2.1 Результаты испытаний сжатых стержней.....	58
2.3 Выводы по разделу 2.....	65
3 АНАЛИЗ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	66
3.1 Определение несущей способности сжатого недеформированного стержня	66
3.2 Определение несущей способности сжатого деформированного стержня	69

3.3 Обоснование величины предельно-допустимой нагрузки при усилении с применением сварки стержней с местными погибами полок	71
3.5. Выводы по разделу 3.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	78
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	81

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая перспективу позитивного развития российской экономики, можно сказать, что оно будет связано, в значительной степени, с реконструкцией и модернизацией предприятий промышленной направленности. Необходима замена устаревшего оборудования, внедрение передовых технологий и многое другое. Все это предоставит возможность изготавливать современную продукцию без увеличения площадей производств, что будет иметь существенно меньшие расходы, чем новое строительство.

Все перечисленные выше задачи находятся в тесной связи с эксплуатацией строительных конструкций, в том числе и металлических. Имеется большой парк строительных конструкций, изготовленных из металла, в той или иной степени потерпевших физический и моральный износ. Таким образом, необходимо будет усиление отдельных частей каркаса, в том числе и строительных ферм покрытия.

Большой процент подобных ферм – это стержневые конструкции, изготовленные из уголкового проката с листовыми узловыми фасонками.

В большинстве случаев для увеличения их несущей способности не требуется усиление большого количества стержневых элементов. В этом кроется главная причина частого использования методов усиления, связанных с увеличением несущей способности лишь некоторых из них, являющихся наиболее слабыми, напряжёнными. Среди подобных методов наиболее часто применяемым, эффективным и простым технологически, становится метод увеличения сечений стержней путём присоединения на сварке дополнительных стержневых элементов.

Опыт обследований показывает, что многие из сжатых стержней имеют начальные деформации: общие выгибы и местные погибы (смалкование и размалкование) полок.

Сварка накладывает свои особенности (порой негативные) на работу усиливаемых элементов: имеет место разогрев стержней, появляются временные и остаточные деформации.

В настоящее время исследования напряженного состояния усиливаемых сжатых деформированных стержней стальных стропильных ферм практически отсутствует.

Актуальность работы, таким образом, определяется настоятельной необходимостью получения начальной информации об особенностях работы усиливаемых сжатых стержней, имеющих начальные деформации, с целью создания базы для проведения дальнейших более углубленных исследований в этой области.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Систематизация дефектов и аварий стальных ферм покрытия производственных зданий

В зависимости от множества факторов находится надежность стальных конструкций и сооружений. К таким факторам относятся: марка материала, сечение элементов, их формы, качество изготовления и монтажа, условия эксплуатации, своевременного ремонта, в нужных случаях усиление конструкций и так далее. Все вышеуказанные факторы оказывают влияние на срок нормальной эксплуатации, дают определение несущей способности сооружения и его отдельно взятых конструктивных элементов.[4]

Основные упущения и ошибки, при которых долговечность и несущая способность стальных ферм ухудшается можно разделить на:

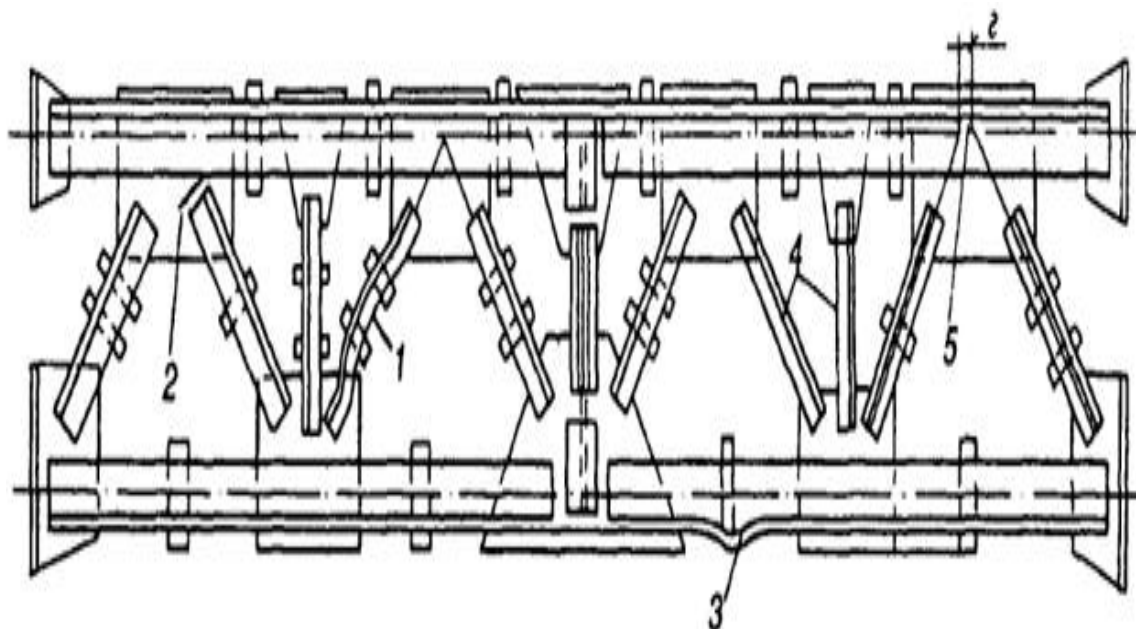
- некачественное изготовление стальных ферм покрытия;
- ошибки допущенные при монтаже конструкции;
- неправильная эксплуатация конструкции

1.1.1 Дефекты возникающие при изготовлении стропильных ферм

Искривление сжатых элементов - наиболее часто встречающийся дефект изготовления, представляющий большую опасность. Как показывают исследования, выполняющиеся на заводах металлоконструкций, до пятнадцати процентов элементов ферм с искривлениями, которые превышают допустимые по нормам, уже во время стадии изготовления. К основным причинам искривления элементов ферм можно отнести недостаточную правку проката и влияние сварки во время несимметричного наложения швов. Чаще всего повреждению подвергаются средние гибкие

элементы решетки. При увеличении гибкости величина искривлений тоже увеличивается. Число элементов, которые искривлены в плоскости и из плоскости фермы, во время изготовления приблизительно одинаково.[12]

Основные дефекты и повреждения стальных ферм покрытия представлены на рисунке 1.



1- искривление стержня; 2- трещина в фасонке; 3- вмятина; 4- отсутствие соединительных прокладок; 5 - расцентровка стержней в узле фермы.

Рисунок 1 - Дефекты и повреждения стальных ферм покрытия

Искривление элементов ферм, влечет за собой перераспределение дополнительных моментов, прогибы фермы начинают увеличиваться. Особенно опасным является искривление сжатых элементов. Как показывают исследования, уменьшение критических напряжений в искривленных стержнях достигает от пятнадцати до тридцати процентов. На практике были случаи аварий, которые вызывались искривлениями сжатых раскосов.

Совсем недавно сварные соединения элементов ферм делались ручной сваркой, из-за этого имели большое число дефектов, наиболее существенными из них являются подрезы и неполномерность шва (рис. 2).

Но количество дефектов стало значительно меньше после того, как при выполнении швов стала использоваться полуавтоматическая сварка.

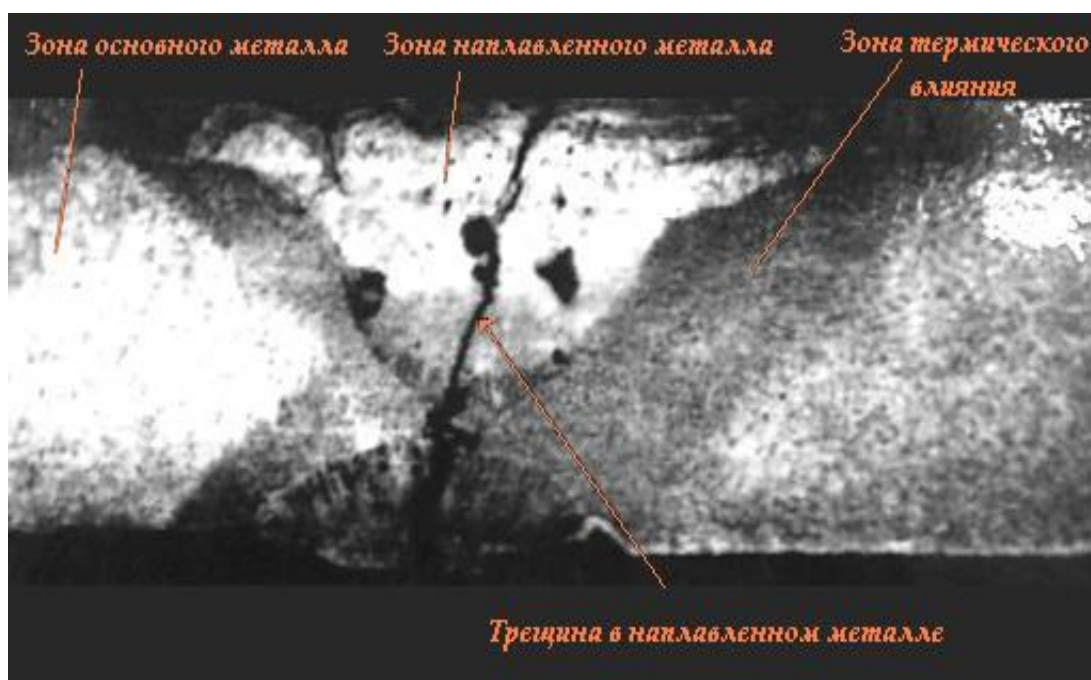


Рисунок 2 - Дефекты сварных швов

Сравнивая с проектом, неполномерные швы с меньшей высотой катетов понижают несущую способность узлов. Говоря о подрезах, кратерах, неравномерной высоте шва – все они увеличивают концентрацию напряжений и становятся особенно опасными в случае эксплуатации ферм при температуре ниже нуля градусов (в зданиях без отопления) и при наличии динамических и вибрационных воздействий (таких, как подвесные краны). Зачастую, во время изготовления ферм не соблюдается указание норм о минимальном (не меньше 40 миллиметров) расстоянии между поясами и торцами элементов решетки. В подобных фермах, в итоге возможного при кантовках перегиба фасонки, который локализуется на участках малой длины, были отмечены трещины в узлах. И, к тому же, при небольшом расстоянии между расположением швов в фасонках, возникает поле растягивающих сварочных напряжений, что влечет опасность увеличения хрупкого разрушения.

Так же, зачастую, расцентровка элементов ферм в узлах больше допуска на изготовление металлоконструкций, и именно вовремя изготовления ферм в мастерских или полевых условиях. Согласно данным исследования, эксцентриситет иногда доходил до 20 сантиметров. Иные моменты, которые возникают в узлах, влекут за собой изгиб стержней и наиболее раннее развитие пластических деформаций, вплоть до возникновения пластического шарнира. По длине стержня быстро затухают пластические деформации. Если для растянутых элементов ферм даже во время заметной расцентровки не происходит значительного уменьшения несущей способности, то сжатые элементы могут раньше срока потерять устойчивость, и, к тому же, на участках, которые примыкают к узлу, во время развития пластических деформаций может иметь место местная потеря устойчивости полок.

В завершении, стоит сказать, что очень распространенный дефект - это изготовление ферм с элементами, содержащих парные уголки - пропуск соединительных прокладок. При неимении прокладок или постановке лишь одной, каждый из уголков начинает работать отдельно, что во время сжатия может повлечь за собой более раннюю потерю устойчивости.

1.1.2 Дефекты стропильных ферм при монтаже конструкции

Не всегда является соответствующим требованиям нормативных документов и качество монтажа конструкций покрытий. Как следствие неаккуратной перевозки, хранения и подачи конструкций на место монтажа, становится гораздо больше число и величина искривлений стержней ферм. Если во время изготовления искривление элементов в плоскости и из плоскости ферм имеет равную вероятность, то во время монтажа искривления, как правило, направлены из плоскости ферм.

Из иных дефектов монтажа стоит акцентировать внимание на пропуске накладок и некачественном выполнении сварных швов в монтажных узлах (рис.3), отклонении ферм от вертикальной плоскости, смещении узлов ферм

относительно осей колонн, внеузловое опирание прогонов и плит, и прочие наиболее серьезные дефекты монтажных узлов.



Рисунок 3 - Некачественное выполнение сварных швов

Для ферм покрытий с восходящим опорным раскосом и передачей опорного давления на уровне нижнего пояса отклонения от вертикальной плоскости, почти не отражаются на их работе, так как диск кровли противостоит боковым перемещениям. При нисходящем опорном раскосе и передаче давления на уровне верхнего пояса под нагрузкой, начинается нарастание отклонений, и, следовательно, изменяется схема работы фермы.

Смещая опорные узлы ферм относительно колонны, не возникает влияние на работу ферм, но появляются в колоннах дополнительные моменты, что необходимо учитывать при расчетах. Изгиб поясов вызывает внеузловое опирание прогонов и плит, и в то же момент, что видно из результатов исследований, если точка приложения нагрузки находится не за пределами фасонки, то небольшими являются дополнительные напряжения в поясах и практически не уменьшают несущую способность ферм.

Во время крепления ферм к боковым граням колонн, к наиболее часто встречающимся дефектам монтажа можно отнести:

- перекося опорной поверхности фланца фермы и внецентренная передача нагрузки на опорный столик;

- зазор между фланцем и опорным столиком и "зависание" фермы на монтажных болтах; зазор между фланцем и колонной, и малая площадь опирания фланца на опорный столик.

Вышеуказанные дефекты подвергают искажению схему работы опорного узла, которую приняли при расчете, и влекут за собой перенапряжение его элементов. Очень опасным является отсутствие опорного столика и передача через нерасчетные монтажные болты опорного давления фермы на колонну. Например, этим было вызвано обрушение ферм на одном металлургическом заводе.

1.1.3 Влияние различных причин и факторов ухудшающих работу элементов конструкции стропильной фермы при ее эксплуатации

Основными видами повреждения фермы, которые возникают при эксплуатации, становятся искривления и местные погибы элементов. Как и во время изготовления, гораздо чаще подвергаются повреждению средние гибкие элементы решетки. Большая часть искривлений имеет направление из плоскости ферм. Из всех причин, которые вызывают искривления и местные погибы элементов в результате эксплуатации, стоит отметить следующие:

- первичные несовершенства (местные погибы и искривления), которые возникают в результате изготовления и монтажа;
- не выполнение требований технической эксплуатации (например, когда для ремонта оборудования используют фермы для подвески блоков, крепление коммуникации между узлами и т. п.);

- принятая при проектировании расчетная схема не соответствует фактической расчетной схеме (ужесточение при шарнирной расчетной схеме опорных узлов ферм, внеузловое опирание прогонов и плит, пропуск связей, закрепляющих сжатые пояса из плоскости ферм, и т.п.);
- воздействие температуры в горячих цехах;
- перегрузка ферм.

Когда фермы работают под нагрузкой, первичные искривления сжатых элементов становятся больше, а растянутых — меньше. В связи с этим, если при исследовании выявлено, что количество искривленных сжатых и растянутых элементов имеет почти одинаковое количество, то главная причина их повреждений - низкое качество изготовления и монтажа.[15]

Когда подвешиваются блоки и крепятся коммуникации, общие искривления зачастую идут вместе с местными погибами, но будут оставаться следы от крепления тросов на элементах. Подобные повреждения очень часто встречаются в поясах ферм. Ужесточая опорный узел ферм (увеличивая толщину фланца, обварку узла) при шарнирной расчетной схеме, это может привести к появлению дополнительного, который нельзя учесть расчетом, опорного момента. Перегрузка ферм возникает из-за возрастания веса собственного покрытия (использование наиболее тяжелых, нежели принятых в проекте, плит покрытия, изменение размера в большую сторону толщины и увеличение веса утеплителя и стяжки, добавление слоев гидроизоляционного ковра и тому подобное), подвеске добавочных, которые не были предусмотрены в проекте коммуникаций и оборудования, отложений пыли на кровле, множественных снегоотложений, которые превышают расчетное значение снеговых нагрузок и образование снеговых мешков.

К обрушению ферм может привести потеря устойчивости, возникшая при создании большего числа нагрузок на сжатые элементы, в особенности,

если они имели первоначальные погибы или искривления. Пластические деформации могут развиваться в растянутых элементах при увеличении нагрузки, как следствие, происходит увеличение прогиба фермы, и в элементах усилия перераспределяются. Однако, исходя из исследований, разрыв растянутых элементов - это явление весьма редкое, даже в условиях больших перегрузок, что говорит о конкретных запасах их несущей способности. Крайне редко встречается и разрушение, и повреждение сварных и клепаных соединений ферм от перегрузок при хорошем качестве их изготовления.

Бывает, что в горячих цехах температура нагрева конструкций покрытия достигает от двухсот до трехсот градусов по Цельсию. Во время данных условий и во время стеснений температурных перемещений в нижних поясах, возникают сжимающие усилия, превышающие критическую силу потери устойчивости. Вследствие этого, элементы нижнего пояса подвергаются искривлению, и ферма приобретает большие прогибы.

Трещины в фасонках и стыковых накладках ферм, хоть и встречаются на практике редко, но является одним из наиболее опасных повреждений. Их возникновение связано, обычно, с плохим качеством материала (использование кипящих сталей, которые очень загрязнены вредными примесями), присутствием острых концентраторов (таких как надрезы кромок, дефекты сварных швов и так далее), предварительным пластическим деформированием металла, как результат перегибов при кантовке ферм. При данных условиях, вполне вероятно, что трещина может появиться и при достаточно маленьких рабочих напряжениях (для кипящих сталей от 4 до 5 кН/см²). Во время использования конструкций при пониженной температуре (меньше критической для выбранной марки стали) или изменении размера нагрузки в большую сторону, трещины находятся в развитии и могут повлечь за собой обрушение конструкций.

Довольно редко встречается расстройство болтовых соединений в опорных узлах ферм; связано оно, как правило, с повышенными динамическими воздействиями кранов. Весьма мощное сечение элементов имеют подстропильные фермы; они повреждаются в наиболее меньшей степени, в сравнении со стропильными.

Массовый характер имеют повреждения связей по покрытию, особенно в горячих цехах и в зданиях, в которых эксплуатируются краны, особенно тяжелого режима работы. К более часто возникающим повреждениям связей, можно отнести искривления и местные погибы, удаление связей для пропуска коммуникаций, расстройство узлов крепления. К тому же, уменьшается пространственная жесткость каркаса, становится больше расчетная длина сжатых поясов ферм, искажается проектное положение конструкций. Удаление или повреждение распорок по верхним поясам ферм в подфонарных участках вызывают особенную опасность, это в силах повлечь за собой потерю устойчивости пояса и привести к обрушению покрытия. При небольших зазорах между мостовыми кранами и конструкциями покрытия, связи, которые провисают, не дают возможность нормально эксплуатировать краны.

Недостаточность площади опирания плит покрытия на стропильные фермы и прогоны являются опасным дефектом - это может довести до обрушения кровли. К одним из грубых нарушений требований монтажа, можно отнести и отсутствие приварки железобетонных панелей к поясам ферм, т. к. при этом условия раскрепления поясов становятся хуже, и их расчетная длина становится больше.

Коррозионную стойкость решетчатых элементов покрытия делают ниже: сложная конфигурация сечений, малые толщины проката, зазоры в элементах из парных уголков. Причинами развития равномерной коррозии элементов являются: повышенная влажность воздуха, наличие агрессивных по отношению к металлу компонентов. Протечки кровли и стенового

ограждения, выделение пара или конденсата из-за неисправностей стыков трубопроводов подталкивают в развитии местные коррозионные поражения. Особо сильные местные коррозионные поражения появляются в опорных узлах стропильных и подстропильных ферм, которые расположены рядом с воронками внутренних водостоков, в верхних поясах ферм в местах опирания фонарей. Увеличению коррозии способствует скопление пыли на элементах конструкций, в частности, в случае ее увлажнения. Самая большая скорость коррозии элементов покрытия наблюдается в травильных, гальванических и прочих производствах, которые связаны с агрессивными жидкостями, располагающихся в незакрытых емкостях.

Значительная часть площади поверхности решетчатых конструкций, затрудненный доступ ко всем элементам, в частности к верхним поясам, становится сложнее добиться качественной подготовки и окраски. В итоге, уже спустя 2-3 года после дополнительной окраски защитные покрытия начинают разрушаться, и коррозионный процесс интенсифицируется.

1.2 Анализ аварий стальных конструкций производственных зданий

1.2.1 Классификация аварий стальных конструкций

Согласно классификации советского исследователя, Ф. Д. Дмитриева[6], причины крушений можно разделить по трем основным группам:

- крушения, которые вызваны ураганом, наводнением, землетрясением и т. п.;
- крушения, которые вызваны не идеальностью инженерно-технических приемов (наиболее крупная группа);
- крушения, причины, вызванные социально-экономическими условиями, которые присущи капиталистическому миру.

Также, технические причины катастроф разделяются на три группы:

- дефекты основания;

- потеря устойчивости;
- неудовлетворительное производство работ.

А И. Мизюмский дает такую классификацию аварий и крушений [14], где рассмотрены исключительно металлические конструкции, причем тех аварий, которые вызваны исключительно инженерно-техническими причинами:

- вызванные дефектами, которые связаны с ошибками проектирования;
- вызванные дефектами, которые возникли в процессе производства работ;
- вызванные дефектами, которые связаны с эксплуатацией;
- вызванные недостаточной изученностью условий работы и свойств применяемых материалов.

Крепость конструкций и сооружений находится в зависимости от множества условий: марка материала, сечение элементов, их формы, качество изготовления и монтажа, условия эксплуатации, своевременный ремонт, в нужных моментах усиление конструкций и тому подобное. Все указанные условия оказывают значительное влияние на время нормальной эксплуатации, они определяют несущую способность сооружения и его конкретных конструктивных элементов. Любая рассматриваемая авария - это совокупность нескольких причин, сочетание различных неблагоприятных факторов.

Во множестве случаев, при целостном обрушении конструкции, бывает очень сложно определить главную причину аварии. Так, к примеру, при осмотре обрушившихся ферм с погнутыми стержнями, сами собой возникают догадки на возможную потерю устойчивости; при наиболее детальном исследовании характера обрушения обнаруживается, что данные стержни в действительности потеряли устойчивость, но уже во время обрушения - падения одних конструкций на другие.

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.

1.2.2 Причины аварий металлических конструкций

Металлические конструкции прибывают в немного худшем положении, нежели инженерные конструкции, которые выполнены из иных материалов. Высокие расчетные сопротивления и обусловленные ими легкость и ажурность металлических конструкций могут повлечь за собой то, что недостаточное сопротивление только одного конструктивного элемента (затяжки в арках и рамах) приводит к аварии всей конструкции. В строительной практике имеются примеры, когда причиной аварии каменных, бетонных, деревянных и других конструкций являлись дефекты металлических элементов, которые входили в общий конструктивный комплекс. Основные причины и условия аварий металлических конструкций можно разделить следующим образом:

1. Перегрузка конструкций;
2. Потеря устойчивости;
3. Неудачные проектные решения;
4. Ошибки, допущенные при изготовлении и монтаже конструкций;
5. Ошибки, допущенные при эксплуатации конструкции или сооружений;
6. Аварии в результате усталости металла и вибрации;
7. Дефектность оснований, на которые установлены металлические конструкции;
8. Непредвиденные причины аварий

1 Перегрузка конструкций

Анализируя большое число аварий и аварийных состояний конструкций из источника[11], можно сделать вывод, что большинство их случается из-за снеговой перегрузки, которой при использовании сооружений не уделяют должного внимания. Принятые же своевременно к эксплуатации сооружения, которые очень часто выполнены по типовым проектам, которые рассчитаны на усредненные, а не на действительные для каждого определенного объекта нагрузки, продолжают эксплуатировать, не придавая значения несоответствию между проектными и реальными нагрузками. При изучении и исследовании причин аварий конструкций зданий и сооружений ряда производственных цехов цементных заводов, было установлено следующее: обрушение кровельных покрытий обусловлено, в основном, сильной перегрузкой конструкций, значительным скоплением сцементированной технической пыли на кровле и, в виде исключения, иными причинами. Обращение внимания на реальные метеорологические условия играет огромную роль при проектировании, особенно, при использовании сооружений. Цель разработать способы борьбы со снеговыми мешками и заносами на кровлях должна быть обязательной частью проекта инструкции по эксплуатации и уходу за зданием. Также, не стоит переоценивать возможности механизированной уборки снега, например, для кровель с большой площадью в плане, очистить которые от снега даже механизированным способом достаточно тяжело. В данном случае наиболее эффективным методом является растапливание снега и его удаление через систему водостоков.

2 Потеря устойчивости

За очень редким исключением, не существует аварии или крушения, где не имела бы места быть потеря устойчивости отдельными элементами или всей конструкцией в целом. Потеря устойчивости бывает двух видов: общей или местной. Опасность аварии от потери устойчивости очень велика оттого, что потеря устойчивости может случиться неожиданно. Так, к примеру, при достижении в элементе конструкции сжимающей силой своего критического значения, вполне достаточно дать малейший толчок в поперечном к продольной оси направлении, чтобы стержень потерял свою устойчивость. Из всех существующих инженерных конструкций, металлические - наиболее подвержены потере устойчивости, так как они изготавливаются из относительно длинных и тонких стержней.[24] Потеря общей или местной устойчивости сжатыми элементами весьма часто случается из-за отсутствия необходимой развязки сжатых поясов как и во время монтажа, так и во время эксплуатации и не своевременной постановки постоянных и временных связей жесткости, а также, при наличии в конструкции случайно изогнутых стержней, например, при эксплуатации, как бывает в некоторых случаях, верхнего пояса ферм для подъема грузов, или же во время использования в стержневых конструкциях уголкового профиля малых размеров, которые во время транспортировки и монтажа могут приобрести искривления, вмятины и ряд иных дефектов. Не редкость и случаи потери устойчивости в стержневых системах фермы, арки, рамы, как следствие неполного учета знакопеременности усилий. В подобных случаях стержни необходимо проверять дважды: на растяжение и на сжатие с продольным изгибом. Сжатие, если даже оно мало по сравнению с растягивающим усилием, вызывает продольный изгиб стержня, который может привести к выходу из строя сначала одного стержня, перераспределению усилий в остальных и, в итоге, к аварии.

- Авария, которая вызвана недостаточным количеством и неверной расстановкой связей;

- Аварии, которые вызваны местной потерей устойчивости;
- Недоучет знакопеременности усилий.

3 Неудачные проектные решения

Довольно часто встречаются аварии, произошедшие из-за различных дефектов, которые были допущены при проектировании металлоконструкций. Перечислить все дефекты в проектировании, имеющие место в прошлом и, естественно, способные встретиться в будущем, является невозможным. Но, анализ аварий и крушений металлоконструкций, произошедших в течение последних лет, дает возможность выделить такие факторы:

1. Несоответствие реальной работы здания (конструкции) расчетным предпосылкам, которые были положены в основу расчета; не учет всего многообразия силовых воздействий на конструкцию, приводящего к неверной и неполноценной оценке напряженного состояния материала; ошибки в расчетах и конструировании.
2. Не полностью продуманная расстановка связей пространственной жесткости, уменьшение их количества, что главным образом относится к фонарям и фермам.
3. Пренебрежительное отношение к необходимости своевременного выполнения усиления конструкций при изменении режима эксплуатации здания; неспособность обеспечить условия ремонтпригодности.
4. Использование несоответствующих марок стали, в основном Ст.Зкп, в конструкциях, которые работают при низких температурах.
5. Не все время учитываются изменения размеров в прокатных профилях по новому сортаменту, с уменьшенной толщиной стенок,

сравнительно с размерами, имеющих место в соответствующих профилях по старым ГОСТам.

б. Внесение разных изменений и корректировок в типовые, уже проверенных на практике конструкций, без удовлетворяющего на то обоснования. В сумме, данные факторы приводят к следующему: прочность оказывается недостаточной, жесткость, устойчивость конструкций или отдельных элементов, происходят хрупкие поломки.

Некоторые из повреждений подкрановых балок можно объяснить тем, что до сих пор действительная их работа не в полной мере вскрыта;

- при проектировании непостоянно в полной мере учитываются крановые воздействия на балки и действительные условия их использования;

- усталость металла (цикличность крановой нагрузки вызывает в балках и элементах креплений циклические (знакопеременные) напряжения. Критерием прочности и выносливости подкрановых балок считаются максимальные касательные напряжения, которые вызывают появление усталостных трещин).

- применение конструктивных решений, которые содержат разного вида накладки;

- крепления решетки через косынки с резкой концентрацией напряжений;

- соединение разрезных балок на опоре горизонтальными и вертикальными накладками, а торцовых ребер смежных балок болтами (подобный способ крепления вызывает частичное защемление балок, как результат возникают дополнительные напряжения, которые не учитываются расчетом).

Хрупкое разрушение конструкций

После аварий, которые вызваны потерей устойчивости, аварии в результате хрупкого разрушения, можно сказать с уверенностью, занимают, первое место. Данный вид разрушений, следуя указанной классификации,

логично отнести к авариям, которые основаны на причинах которых являются не совсем удачные проектные решения или невыполнение проекта. Последнее существует в тех случаях, когда проектная марка стали без четкого обоснования, подлежит замене иной.

- Хрупкое разрушение стали может существовать при работе конструкций в условиях низких температур (одно из наиболее часто встречающихся разрушений);

- в случае применения материалов, которые подвержены хрупкому разрушению, но при этом, аварии могут случаться и при нормальных температурах;

- под влиянием всевозможных дефектов, в основном, металле и сварных швах;

- при определенных условиях напряженного состояния материала;

- при воздействии на конструкцию ударных и других видов динамических нагрузок.

Склонность стали к хладноломкости является одним из важнейших факторов, которые вызывают хрупкое разрушение. Особенно неблагоприятное на конструкцию влияние оказывает наличие концентраторов напряжений отверстий, прорезей, трещин, подрезов, расположенных в местах и на участках с высокими местными напряжениями, и которые ориентированы поперек направления действующих растягивающих напряжений.[27] Хрупкому разрушению способствует неверное исполнение сварных работ, особенно в зимнее время года, которое заключается в отсутствии подогрева изделий при температуре окружающей среды менее 30° С, отсутствии защиты от ветра, использовании электродов ненадлежащих марок, неисполнении конкретного порядка в последовательности наложения сварных швов, отсутствии контроля качества сварных соединений. В конструкциях, которые работают под давлением, не

рекомендовано наличие концентраторов напряжений в виде отверстий, лазов, приварки различных деталей для крепления вспомогательных элементов.[1]

4 Ошибки, которые были допущены при изготовлении и монтаже конструкций

Причинами, в основном, выступали: грубые несоблюдения СНиП, низкое качество реализации работ, отступления от проектов производства работ. Дефекты, которые допускаются при изготовлении и монтаже, не всегда мгновенно приводят к аварии. Зачастую, даже грубые отступления от проекта и технических условий, показывают себя не сразу, а при не благоприятном взаимодействии нескольких факторов. Аварии металлических конструкций могут быть вызваны огромным рядом ошибок, дефектов, которые возникли при изготовлении конструкций. К ним можно отнести:

- использование низкокачественных материалов для изготовления конструкций, которые работают при конкретных специфических условиях;
- низкое качество изготовления соединений (заклепки, болты, сварка), отступления от проекта;
- недостатки при хранении конструкций;
- Замена отдельных профилей другими без обоснования, которая не подкреплена расчетом (относится и к конструкциям, и к материалам, которые предназначены

Металлические и железобетонные (говорится о сборном железобетоне) конструкции во многих случаях выполняются и поставляются на монтаж с недопустимыми дефектами, отклонениями геометрических размеров элементов от проектных, с дефектами сварных соединений закладных частей, наличием местных деформаций и повреждений элементов. Никак нельзя допускать монтаж стальных конструкций на не подготовленных для этого

площадках, без необходимой геодезической проверки и приемки фундаментов, закладных частей и прочего. При монтаже конструкции работают в условиях, которые отличаются от тех, во время которых они будут работать в период использования, в связи с этим, при монтаже необходимо соблюдать все технические нормы и правила. К примеру, на конкретном этапе монтажа, в конструкциях не имеются ограждающие элементы, повышающие жесткость каркаса, и обеспечивающие его пространственную работу. В период сборки и монтажа конструкции могут на протяжении долгого время пребывать на морозе, что не для всех материалов (особенно для тех, что имеют невысокий порог хладноломкости) является безразличным. Неверное ведение монтажа конструкций и оборудования, не полностью продуманные места строповки конструкций, зачастую влекут за собой аварии. Особенно опасной является строповка за элементы несущих конструкций вне узлов. Самыми частыми являются аварии при монтаже из-за не вовремя поставленных связей, которые обеспечивают пространственную жесткость плоских конструкций, недостаточного закрепления связей (исключительно их «прихватка»), не вовремя поставленные монтажные болты, распорок и тому подобное. Самые типичные дефекты при монтаже каркасных промышленных сооружений это:

- отклонения верха колонн, что приводит к увеличению в них напряжений;
- смещения узлов верхнего и нижнего поясов ферм из плоскостей (время от времени доходящих от 100 до 300 миллиметров);
- непровары и подрезы в сварных швах;
- сборка конструкций с большими эксцентриситетами;
- монтаж связевых элементов без предварительной их приварки;
- замена жестких узлов шарнирными, и наоборот.

5 Ошибки, которые допущены при эксплуатации конструкции (сооружения)

Наиболее типичными являются следующие факторы, которые вызывают аварии конструкций и сооружений в результате всевозможных дефектов, которые допущены при эксплуатации:

1. Отсутствует периодический осмотр состояния конструкций и их профилактического ремонта. Главными профилактическими мерами по борьбе и предупреждению аварий должны являться: регулярный надзор за состоянием конструкций (сооружений); своевременное и тщательное исследование аварийного состояния, если оно будет замечено.

2. Подвеска к несущим металлическим конструкциям всевозможного дополнительного оборудования, также внесение разных изменений в имеющиеся конструкции: рассверловка отверстий для болтов, устройство различных прорезей, лазов и других отверстий.

3. Ошибки, которые были допущены при реконструкции и усилении конструкций и сооружений. Сюда, в первую очередь, можно отнести ошибки, допущенные при усилении, выполняющееся в конструкции, которое находится в напряженном состоянии, при усилении, которое выполнено в условиях эксплуатации сооружений.

4. Перегрузка снегом, наледями и производственной пылью.

5. Отсутствие наличия защиты конструкций от коррозии, которая возникает под воздействием агрессивной производственной среды природно-климатических факторов. Регулярный плановый осмотр и исследование конструкций должны выявлять возможность их усиления, и вовремя остановить наступление аварийного состояния.

6. В листовых конструкциях (баки, цистерны, различного вида резервуары, газгольдеры и т.п.), а особенно в тех, что работают под давлением, к авариям приводит нарушение правил наполнения и разгрузки конструкций при их использовании.

7. Аварии, которые вызваны безответственностью, допущенной при использовании.

б Аварии, произошедшие в результате усталости металла и вибрации

Самыми регулярными конструкциями, аварии которых случаются в результате усталости металла от циклических нагрузок, регулярно повторяющихся, становятся подкрановые балки. Из-за этого, кроме разработки оптимальной конструкции балки, нужно обеспечить еще и высокий уровень качества ее изготовления. Большое значение имеет и грамотная установка колонн, на которые в последующем будут опираться балки, соблюдая нормативные допуски. Несоблюдение данных допусков делает сложнее опирание балок, может привести к устройству подкладок, хомутов и тому подобного, и тем самым делая условия работы балок хуже. Эксплуатационные качества подкрановых путей в большой степени находятся в зависимости от горизонтальной и вертикальной рихтовки крановых рельсов и от плотного контакта рельса с балкой. Второе регулярно изменяется в месте стыка балки двух соседних пролетов (на колоннах). Рассмотрим причины аварий и повреждений подкрановых балок:

Подкрановые балки работают в условиях сложного нагружения. Основные вертикальные и горизонтальные силы не проходят через центр изгиба и вызывают кручение как всей балки, так и верхней ее части. Эксцентричное давление от крана на балку возникает по следующим причинам:

- несимметричное сечение подкрановой конструкции;
- смещение рельса;
- неплотное прилегание рельса к балке;
- эксцентричное давление катков на рельс;
- горизонтальные воздействия крана на рельс, заклинивания, торможения и т.д.

Дефекты, намного чаще встречающиеся, которые приводят к несвоевременному расстройству и выходу из строя подкрановых балок:

- продольность трещины в стенке под поясным швом и в шве крепления верхнего пояса к стенке;

- трещины под короткими ребрами и жесткости (петушками) и в местах обрыва горизонтальных листов нижнего пояса; отрыв тормозных ферм от поясов балок;

- в прокатных балках, которые усилены полосой или швеллером, приварены к верхнему поясу, лопаются швы, которые прикрепляют эти элементы усиления;

- в клепаных балках расстройство, срез и отрыв головок заклепок, которые прикрепляют поясные уголки к стенке и горизонтальные листы верхнего пояса;

- трещины в местах перехода закруглений на полку уголков, расстройство заклепок в стыках, которые расположены в середине неразрезных балок;

- расстройства и трещины в опорных деталях, в деталях крепления балки к колоннам, и в креплении рельсов к поясам балок.

7 Дефектность оснований, на которые установлены металлические конструкции

Аварийное состояние в металлоконструкциях и их обрушение могут существовать в доброкачественных, во всех планах, конструкциях, верно выполненном монтаже и качественной эксплуатации вследствие дефектов оснований, на которых будут установлены металлические конструкции. В связи с этим, перед монтажом, нужно особенно внимательно проверить, верно ли сделаны те конструкции, на которые установятся металлические, а в некоторых случаях состояние грунтов под подошвой фундамента. В особую группу причин, из-за которых случаются аварийные состояния металлических конструкций, входят:

- неравномерность осадки грунта под фундаментами, опираясь на которые стоят металлоконструкции;
- выдавливание грунта из-под фундаментов;
- выпучивание при вымораживании;
- провалы грунта, оползни и т.д.

Неравномерная осадка грунта, как правило, вызывает перекосы, перераспределение усилий между элементами конструкций и т.д., в отдельных случаях статически определимые системы превращаются в статически неопределимые. Подлежит изменению статическая схема работы деформированных конструкций, через превращение их в новые конструктивные формы. Ненадежность оснований, неравномерность осадка, потеря устойчивости опорными конструкциями, приводят к аварийным состояниям.

8 Непредвиденные причины аварий

Строительная практика имеет большое число примеров аварий и обрушений конструкций, которые были вызваны случайными явлениями, которые невозможно было предусмотреть заранее. Изучение последствий подобных аварий дает возможность выявить ряд конструктивных, монтажных и других дефектов (которые при отсутствии аварии имели возможность быть не обнаруженными) и изыскать пути развития в дальнейшем, и усовершенствовать конструкции или отдельные узлы. Особенно богата на примеры аварий практика мостостроения, примеры из данной области являются очень поучительными как для промышленных, так и гражданских сооружений. К авариям мостов приводили абсолютно неожиданные случайности: смазка стеарином опорных шарниров, которая способствовала соскальзыванию опор, смещение груза, который был недостаточно хорошо закреплен, и который перевозился по мосту и т.п.

1.2.3 Примеры аварий стальных конструкций

1 Обрушение стропильных ферм в прессовом цеху металлургического завода в г. Куйбышеве

В прессовом цехе корпуса №3 металлургического завода в конце 1955 года обрушились семь стропильных ферм и кровля на площади 1200 кв. м.

Основными причинами обрушения стропильных ферм, которые привели к аварии в цеху, можно считать грубые нарушения при монтаже конструкций, а также несоблюдение правил эксплуатации здания. Обрушение ферм вызвалось низким качеством сварки опорных узлов, срезом одной из опорных фасонки по швам на торцовом листе и превышающие нагрузки на опорные узлы. [1]

Дефекты сварки в отдельных узлах, значительные непровары в местах примыкания к торцовому листу поясных уголков, поры в некоторых местах швов было вызвано низким качеством сварки опорных узлов. Во время общего осмотра всех стропильных ферм корпуса №3, обнаружилось, что три фермы имели искривленные сжатые раскосы. Стрелка искривления раскосов была 100-200 мм и указывала на, что очевидно, аварийное состояние данных ферм. При усилении аварийных раскосов ферм было выяснено, что деформированные раскосы состояли из двух уголков 75*75*6 миллиметров, вместо двух уголков 90*90*8 миллиметров, указанных в проекте.

Трещины в фасонках были, обычно, параллельны поясам и начинались у конца одного из сварных швов, который прикреплял раскосы. При изучении условий появления данных трещин в фасонках показало, что они появлялись от того, что при подъеме горизонтально лежащих ферм или при перетаскивании их фасонки гнулись в плоскости наименьшей жесткости на весьма ограниченном участке — от концов раскосов до пера уголков пояса.

Трещины в фасонках возникали при относительно небольших углах загиба: от 1° до 5° при ударной нагрузке, и от 15° до 20° при статической нагрузке. Все изломы фасонки имели хрупкий характер.

2 Аварийные деформации стропильных ферм в Нижне- Тагильском заводе металлоконструкций в малярно-погрузочном цехе

Просадка ферм случилась из-за потери устойчивости в плоскости ферм сжатыми раскосами (по счету третьими от колонн среднего ряда). Стрелка искривления одного из данных раскосов была равна 400 мм. Верхний и нижний пояса ферм в аварийной панели тоже были значительно деформированы.

Причиной аварии являлось неблагоприятное перераспределение усилий в фермах из-за их фактической неразрезности и участия фонаря в работе стропильных ферм. Напряженное состояние ферм существенно увеличилось за счет повышенной против нормальной снеговой нагрузки.

Авария дала точно понять, что при проектировании ферм покрытий обязательно было обеспечивать более полное соответствие их конструктивного решения с расчетной схемой, не допускать лишних закреплений, способных нарушить это несоответствие и привести к недопустимому перераспределению усилий в элементах фермы. Особенно опасно создание фактической неразрезности для стропильных ферм, рассчитанных как неразрезные в двухпролетных зданиях, что и указано в приведенном выше случае.

3 Обрушение покрытия печного корпуса Куйбышевского цементного завода в г. Жигулевске

В 1959 году, 26 июля обрушился участок покрытия печного корпуса (над горячими концами печей) Куйбышевского цементного завода.

Авария случилась в 5 часов утра. За два дня до аварии в районе завода лил, не переставая дождь, и неожиданно обрушились 4 стропильные фермы.

При тщательном осмотре конструкций в районе аварии и прилегающих к данной территории участков цеха было установлено, что фермы обрушились вместе с подстропильной фермой без нарушения связи с ней. Ферма, опиравшаяся на подстропильные фермы, сорвалась и упала отдельно.

При падении ферм железобетонными плитами была сорвана также и следующие фермы. Одна из ферм упала на мост крана и частично его разрушила.

Разрушенных узлов или элементов в упавших фермах найдено не было.

Причины, которые вызвали аварию в печном корпусе завода, комиссией по расследованию были сформулированы следующим образом:

- большие усилия сжатия в опорных панелях нижних поясов и опорных раскосах стропильных ферм. Эти усилия возникли от того, что верхние пояса ферм смежных пролетов были соединены на средней опоре 4-мя болтами, вследствие чего фермы становились неразрезными. Опорные раскосы, являющиеся нисходящие к средней колонне (сжатые), оказывались перегруженными, а усилие в нижнем поясе меняло знак, он становился сжатым и это могло привести к потере устойчивости. Усугубила это положение повышенная нагрузка в некоторых местах кровли от цементной пыли.

- явилось разрушение консоли железобетонной колонны, на которую опиралась подстропильная ферма. К тому же, было обнаружено, что колонны находятся в положении несколько отклоненном от вертикали. Из-за этого фактора комиссия усомнилась в удовлетворительном выполнении стыков колонн с фундаментами стаканного типа. Вдобавок, стыки замоноличивали в зимнее время и недостаточно доброкачественно.

Как показали происходящие дальше события, комиссия не установила настоящей причины аварии на цементном заводе, а конкретно, перегрузка перекрытия цементной пылью.

Вторая авария случилась в 1960 году, 16 сентября, на том же участке перекрытия печного отделения (над горячими концами печей), что и указанная выше авария 1959 года.

При тщательном осмотре конструкций, которые обрушились, полных разрывов элементов ферм не обнаружилось. Нашлись надрывы одного уголка

и частичные разрушения сварных швов в местах резких перегибов элементов. Сжатые раскосы некоторых ферм, а конкретно опорные, были подвержены сильной деформации из плоскости ферм (при принятой решетке это направление наибольшей гибкости) и потеряли устойчивость до обрушения ферм, что могло быть вызвано только недопустимой перегрузкой покрытия. На технологическом оборудовании, на обслуживающих площадках, на полу цеха и на упавших конструкциях обнаружилось большие количества цементной пыли в сыпучем состоянии, а также сформировавшейся в виде кусков всевозможных размеров.

Разрушающей нагрузкой для конструкций являлась цементная пыль, которая поступала через аэрационные фонари наружу, и которая скапливалась на кровле. В цеху, к моменту аварии, были установлены и работали 3 печи размером 4,5—5*135 м (с 1958 года - первая, с 1959 года – вторая, и с июля 1960 года - третья), при этом, две печи из трех работали неисправно: холодильники барабанного типа этих печей выделяли обильное количество пыли. Данная пыль через аэрационные поперечные фонари откладывалась на кровле. Очистка кровли от пыли производилась на нерегулярной основе и недостаточно интенсивно; толщина отложений пыли между фонарями на кровле достигла от 70 до 80 см.

В последующем, ввелось требование — не допускать скопления цементной пыли на покрытиях зданий цехов цементных заводов.

4 Разрушение стальных конструкций покрытия машинного зала Северодвинской ТЭЦ

26 марта 1964 года, из-за разнобойных действий эксплуатационного персонала турбинного и котельного цехов, и несоблюдения ими правил технической эксплуатации в условиях повреждения приборов автоматического управления и контроля, вывелся из строя турбогенератор.

В результате начавшегося на турбогенераторе №3 пожара, случился сильный нагрев стальных ферм в части покрытия машинного зала. По

примерным данным, температура воздуха под кровлей машинного зала в месте пожара могла достичь от 700° до 750° С. Шесть стропильных ферм пролетом 24 м потеряли свою несущую способность; их элементы получили большие деформации. Случилось расстройство кровли и ее частичное обрушение.

5 Обрушение части покрытия главного корпуса обогатительной фабрики в г. Апатиты

14 апреля 1964 года, на строительстве главного корпуса апатитонепелиновой обогатительной фабрики №2 комбината «Апатит», обрушились конструкции двух смежных (крайних) пролетов шириной 30 и 36 м.

Комиссия, которая проводила расследование аварии, обнаружила ряд серьезных ошибок в чертежах стальных конструкций, и грубые нарушения правил производства, и приемки строительно-монтажных работ. А конкретно, при монтаже конструкций не установились вертикальные связи и часть распорок по среднему ряду колонн, вследствие чего устойчивость здания в продольном направлении по этому ряду не была в достаточной мере обеспечена. Все это явилось результатом несоблюдения технологической дисциплины инженерно-техническими работниками, которые выполняли монтаж конструкций на обогатительной фабрике.

К тому же, было установлено, что причиной было создание неразрезности стропильных ферм путем двусторонней приварки соединительных планок по верхним поясам; результат этого — потеря устойчивости сжатыми элементами нижнего пояса в крайних панелях. Оказали свое влияние, безусловно, и большие дефекты монтажа; определить степень их влияния на развитие аварии не является возможным.

Авария в г. Апатиты еще раз подтвердила, что обрушение большой площади покрытия из стальных стропильных ферм и крупногабаритных

железобетонных плит возможно, если в нем нет постоянных стальных распорок между верхними узлами ферм.

6 Обрушение стальных конструкций цеха сгустителей Норильского металлургического комбината

В январе 1966 года произошла авария в г. Норильск. Во время строительства обрушилось покрытие цеха сгустителей.

Обрушение данных конструкций произошло во время монтажа последней четверти покрытия. Одной из главных причин обрушения явился разрыв нижнего пояса одной из подстропильных ферм (вероятнее всего третьей по ходу монтажа). Недостаточное раскрепление конструкций покрытия связями (по проекту) привело к тому, что авария не локализовалась в пролете одной подстропильной фермы, а вызвала обрушение всех смонтированных конструкций.

Хрупкому разрушению подстропильной фермы способствовали существенные дефекты сварных швов и сварка при отрицательных температурах.

Стальные конструкции цеха сгустителей были изготовлены в цехе металлоконструкций Норильского комбината без квалифицированного технического контроля за их сваркой, к тому же, при отрицательных температурах. Сигналы о склонности изготовленных ферм к хрупкому разрушению имелись еще задолго до их монтажа. Стальные конструкции доставлялись на стройку из цеха металлоконструкций при низкой температуре воздуха (от -40° до -45° C). Во время перевозки и хранения на складе в шести стропильных фермах были обнаружены хрупкие трещины. Дефектные фермы были исправлены в цехе металлоконструкций с применением накладок; однако в этих накладках также иногда появлялись трещины.

7 Обрушение покрытия сборочного корпуса на заводе «Ленинская кузница»

Обрушение покрытия сборочного корпуса случилось 28 января 1966 года, когда все строительные работы по реконструкции практически уже были завершены.

При осмотре стропильных ферм, которые упали, в ряде мест был обнаружен отрыв фасонки верхнего опорного узла (по среднему ряду колонн) от торцовых планок из-за низкого качества сварных швов, которые соединяли эти детали. Торцовые планки остались 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. Раскосы стропильных ферм у среднего ряда колонн были нисходящие (растянутые).

Комиссия, которая производила расследование аварии, признала, что основной причиной является низкое качество сварных швов, которые соединяют фасонку с торцовой планкой в верхних опорных узлах стропильных ферм (по среднему ряду колонн).

8 Обрушение покрытия в двух блоках мартеновского цеха

9 января 1967 года неожиданно обрушилось покрытие в разливочном и печном пролетах над двумя печами мартеновского цеха металлургического завода.

При осмотре узлов опирания подстропильных ферм было выяснено, что торцовые планки всех опорных узлов фермы сильно деформировались: в отверстиях сохранилась лишь часть болтов, из которых большинство разорвалось с образованием шейки. Более того, при осмотре кровли над печами, которые расположены рядом с теми, над которыми обрушилось покрытие, в районе аэрационных фонарей были найдены огромные скопления мартеновской пыли (в толщину до тридцати сантиметров),

преимущественно плотно слежавшейся; это говорило о том, что пыль долгое время с кровли цеха не убиралась.

Так, недостаточный контроль со стороны монтажников и работников технического надзора за установкой всех деталей монтажных соединений и за соблюдением требований проекта в отношении правильного и своевременного закрепления деталей, которые определяют работу конструкций согласно расчетным предположениям, привел к тяжелым последствиям. Необходимо, чтобы в чертежах КМ и КМД обращалось огромное внимание изготовителей и монтажников конструкций на установку и закрепление подобных деталей и было указано, при каком нагружении эти детали должны быть закреплены. Соединительные накладки на верхних поясах подстропильных ферм в мартеновском цехе завода им. Дзержинского должны были быть поставлены и заварены уже после установки двух смежных подстропильных ферм, до нагружения их весом стропильных ферм и других конструкций покрытия. Такого указания в чертежах не имеется.

1.3 Анализ существующих методов усиления сжатых стержней ферм

Одним из приёмов увеличения срока эксплуатации конструкции - является ее усиление. Вопросы, касающиеся усиления – это независимый раздел проблемы повышения долговечности металлических конструкций и их несущих способностей. В целом, под усилением можно понимать совокупность мероприятий, ориентированных на увеличение несущей способности конструкций, как в целом, так и отдельных её элементов; усиленная конструкция должна соответствовать требованиям её будущей эксплуатации. Обычно, усиления могут требовать, основные несущие конструкции каркасов зданий промышленного назначения, и стальные стропильные фермы покрытия в том числе[2].

Существующие причины усиления стальных стропильных ферм можно разделить на:

- преднамеренное изменение условий работы конструкций;
- непреднамеренное, которое обуславливается наличием в них дефектов[4].

Рассматривая сроки и условия эксплуатации усиливаемой конструкции, способ и срок выполняемых работ, применяемый материал, усиление может быть:

- временным;
- неотложно–аварийным;
- капитальным (постоянным).

Условная классификация причин усиления строительных стальных ферм представлена на рисунке 4.

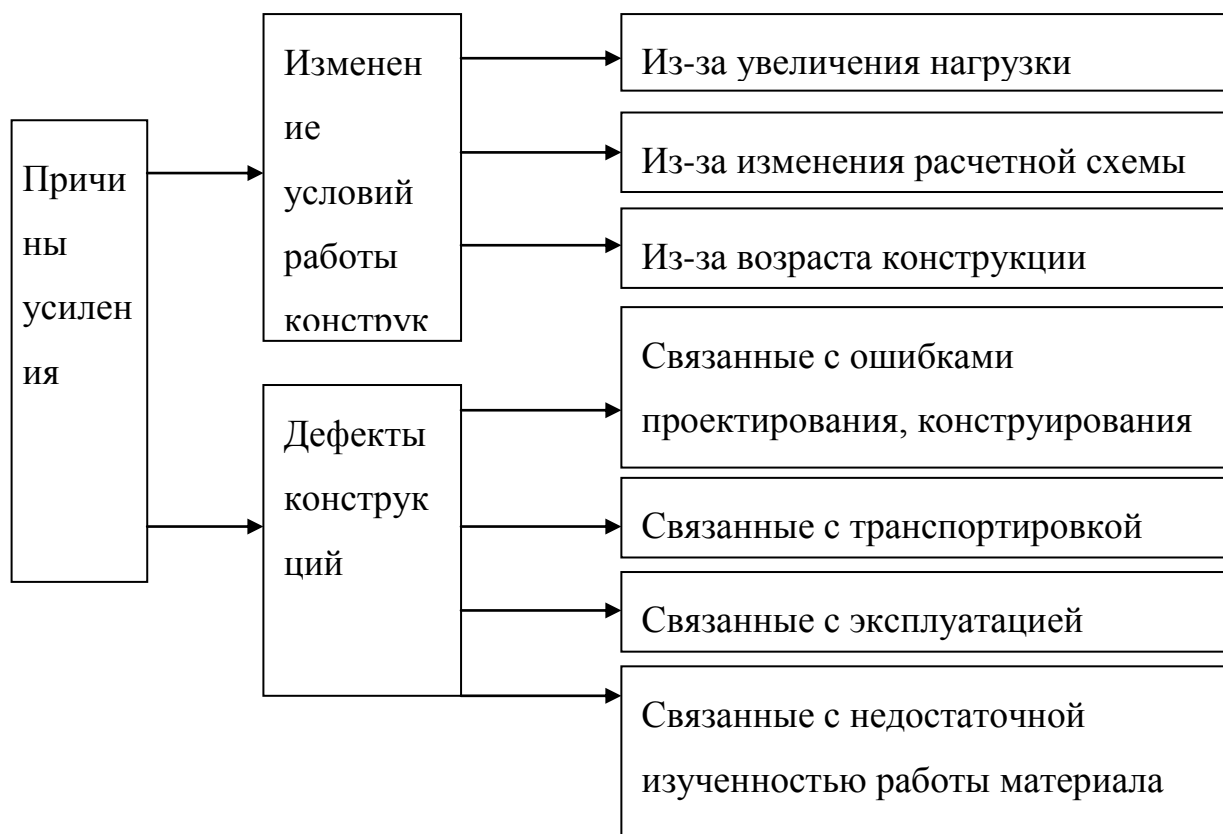


Рисунок 4 - Классификация причин усиления стропильных ферм

Временному усилению подвергаются те конструкции, чья эксплуатация должна начинаться до их капитального усиления. Способы данного усиления упрощены, что можно объяснить недолгим сроком службы конструкции и

крайне коротким сроком работ по усилению. Обычно в качестве материалов подобного усиления применяют канаты, тросы, тязи из круглого железа, присоединение элементов на болтах.

К неотложно–аварийному усилению прибегают в экстренных случаях. В целом, оно имеет те же особенности, что и временное. Однако, есть одно серьёзное отличие: *усиливаемая конструкция может находиться в момент усиления в предельном состоянии.*

Капитальное усиление предполагает долгий срок службы усиленной конструкции. Стандартным материалом усиления в этом случае выступает строительная сталь. Соединение основных и усиливающих элементов производится, в основном, на сварке. Существующие традиционные приёмы усиления ферм по конструктивному признаку можно разделить на усиление в целом и местное усиление [5] (рис. 4).

Усиление в целом включает на:

- изменение расчетных и конструктивных схем усиливаемой конструкции;
- усиление конструкции путем увеличения пространственной жесткости.

Усиление изменением расчётных и конструктивных схем является наиболее действенным в тех случаях, когда необходимо усилить большое количество элементов конструкции. Принцип такого усиления заключен в том, что изменением конструктивных и расчётных схем достигается перераспределение усилий в конструкциях, которое обеспечивает более рациональную их работу[7].

Усиление ферм посредством увеличения пространственной жёсткости достигается путем постановки дополнительных связей, тязей, увеличением сечения стержней и т.п. Необходимость увеличения пространственной жёсткости конструкции может быть вызвана неудовлетворительной развязкой

всего сооружения или конкретных его элементов, устройством подвешного транспорта и т.д.

Местное усиление конструкций, в том числе и ферм, является наиболее популярным при эксплуатации зданий промышленного назначения. Это объясняется следующим:

- необходимостью усиления, в основном, небольшого числа элементов;
- сравнительной простотой производства работ.

Местное усиление ферм предполагает:

- усиление соединений;
- усиление отдельных стержней.

Усиление соединений может выполняться либо с введением в узлы дополнительных элементов (наклонных планок, коротышей, накладок, дополнительных фасонок и т.д.), либо без введения дополнительных элементов, путём увеличения катетов и длин существующих сварных швов.

Усиление отдельных стержней может осуществляться как самостоятельно (при необходимости, как указано выше, усиления небольшого числа элементов), так и совместно с усилением конструкции в целом. Усиление отдельных стержней ферм достигается:

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

Метод увеличения сечения - один из наиболее часто и эффективно применяемых методов. Суть его 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.

Классификация приемов усиления
сварных стальных ферм (по Б.И.Десятову)

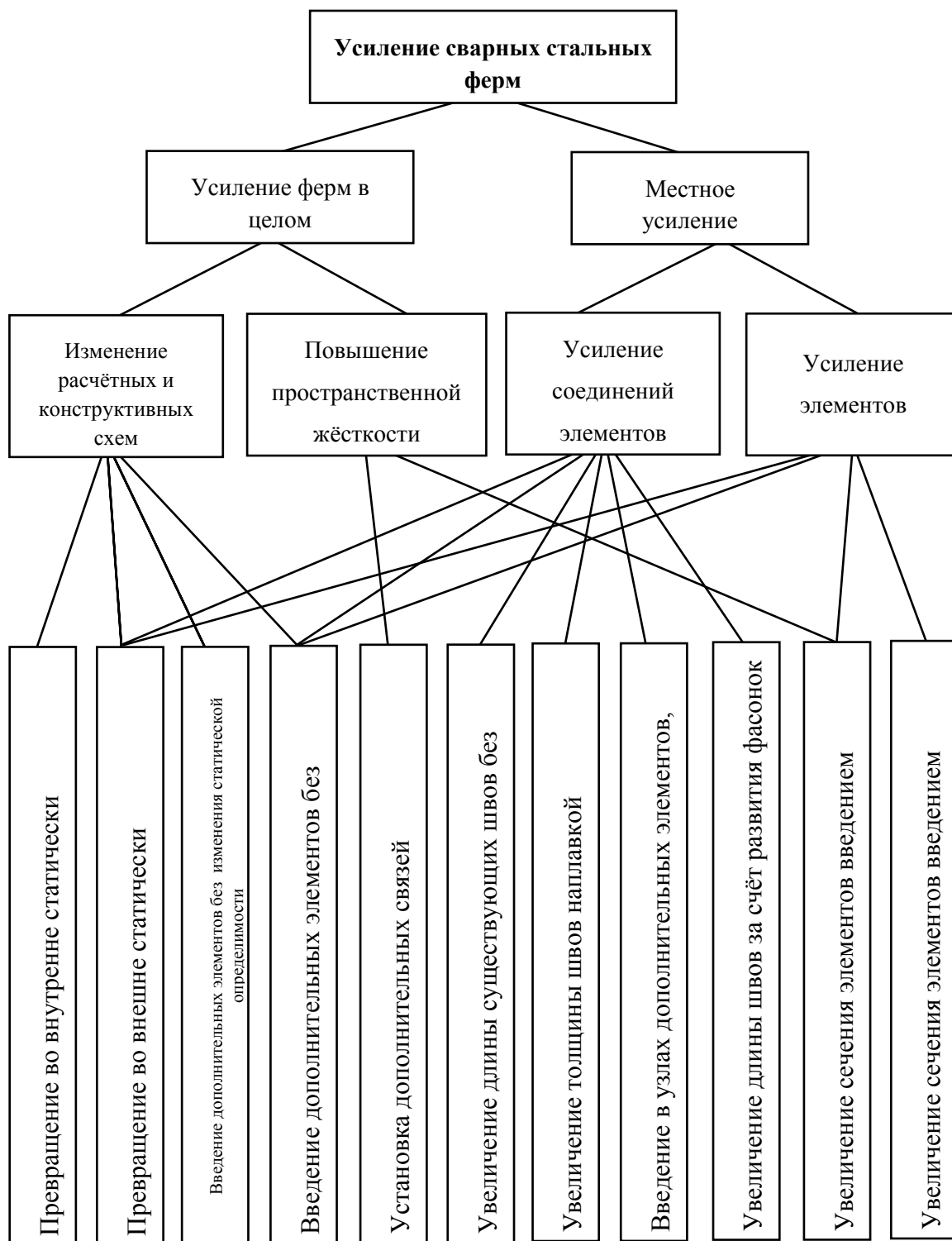


Рисунок 5 - Классификация усиления сварных стальных ферм

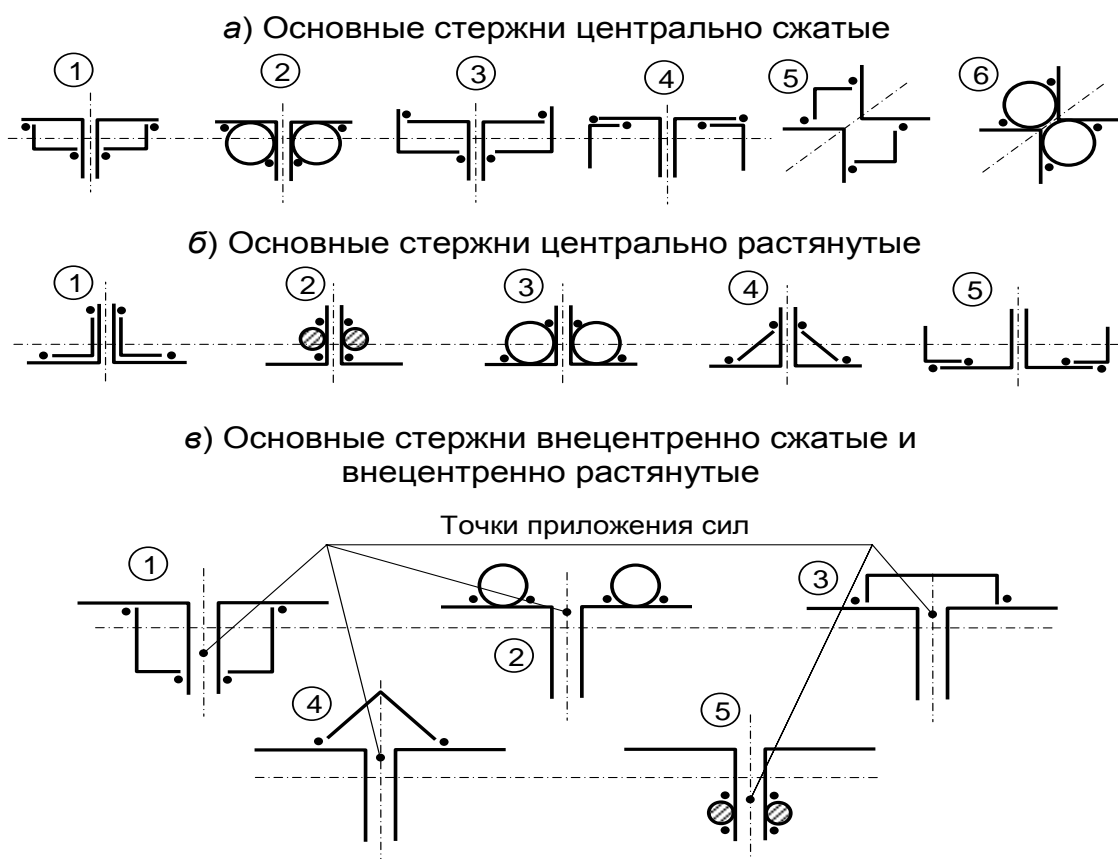


Рисунок 6 - Схемы усиления сжатых стержней стальных стропильных ферм

Присоединение элементов усиления производится, как правило, на сварке. Касательно величины сварных швов в существующей на данный момент литературе, нет достаточно конкретной точки зрения. Например, отмечается, что для прикрепления усиливающих элементов необходимо применять сплошные сварные швы. А автор работы [5] считает возможным в случае отсутствия опасности хрупкого разрушения применение прерывистых швов.

Выбор схемы усиления определяется характером работы усиливаемых стержней. При усилении центрально сжатых и центрально растянутых стержней ферм нужно 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 не забывать о целесообразности увеличения изгибной жёсткости усиливаемых стержней[13].

В связи с вышесказанным, можно говорить, что при центральном сжатии наиболее рациональными будут схемы усиления, представленные на рис. 6, а, при центральном растяжении – схемы рис. 6, б.

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. 6в.

1.3.1 Существующие методики определения напряжённо–деформированного состояния стержней ферм, подвергаемых усилению методом увеличения сечения.

Одним из основоположников теории и практики усиления стальных конструкций, находящихся под нагрузкой является Ф.С.Ясинский. В его работах[28], впервые был найден подход к решению проблем усиления металлических мостов.

Работы по исследованию напряженно-деформированного состояния работы сжатых стоек были проведены Н.С. Стрелецким [26].

Наибольший интерес с точки зрения дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния усиливаемых увеличением стержней ферм представляют собой работы Б.И.Десятова [5], И.С.Реброва [17,18], В.М.Колесникова [10], И.К. Родионов[19-22].

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

проектированию усилений стальных конструкций зданий и промышленных сооружений». Рекомендации прописанные в отношении сжатых стержней допускали производить усиление при нагрузках, вызывающих расчетные усилия в усиливаемых элементах, не превышающие их несущую способность (формула 1.2, табл.1). По формуле (1.1) (табл. 1) предлагалась производить проверку устойчивости усиленных стержней. Также усиление разрешалось выполнять без разгрузки конструкции при условии, определяемой формулой (1.3) (табл.1)

Совместную работу основных и усиливающих элементов при дальнейшем после усиления увеличении нагрузки исследовал В.М. Колесников. Методика расчета усиленных под нагрузкой сжатых стержней была разработана после анализа совместной работы основных и дополнительных элементов [10]. Согласно этой методике проверку устойчивости усиленных элементов следует рассчитывать по формуле (1.4) (табл.1). 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 по формуле (1.5) (табл. 1).

Работы по исследованию напряженного состояния усиливаемых под нагрузкой сжатых проведенные В.М. Колесниковым являются крайне ценными, однако в них не рассматривается такой вопрос, как влияния сварки на работу усиленных стержней. Также в работе автора не был исследован вопрос о работе стержня непосредственно в момент усиления. Отсутствие внимания на влияние сварочного процесса, и приняты коэффициент 0,8 в формуле (1.5) (табл. 1), ограничивает величину допустимой при усилении нагрузки.

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...”]	$\frac{N_0^y}{F_0 \varphi_0} + \frac{N_d}{F_0 + F_y \varphi_{об}} \leq mR \quad (1.1)$	$N_0^o \leq m\varphi_0 R F_0 \quad (1.2)$ при $\varphi_{ia} \geq \varphi_0 \quad (1.3)$	
Колесников В.М.	$\frac{N_0^y + N_d}{F_0 + F_y \varphi_{об}} \leq mR \quad (1.4)$	$N_0^o \leq 0,8m\varphi_0 R F_0 \quad (1.5)$	
Десятов Б.И.	$\frac{N}{\varphi_{ai}^o F} \leq mR \quad (1.6)$	$N_0^o \leq 0,6m\varphi_0 R F_0 \quad (1.7)$	$N_0^o \leq 0,6m\varphi_{ai}^i R F_0 \quad (1.8)$
Ребров И.С.	$\frac{N}{\varphi_{ai}^o F} \leq mm_1 R, \quad (1.9)$ $m_1 = 0,9 \quad (1.0)$	$N_0^o \leq m\varphi_0 R F_0 \quad (1.10)$	$N_0^o \leq m\varphi_{ai}^i R F_0 \quad (1.11)$

Здесь в формулах (1.1 – 1.3) (табл. 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.

Связанные с усилением под нагрузкой сжатых элементов ферм, а также узловых прикреплений этих элементов увеличением длины сварных швов были проведены исследования Б.И. Десятовым.[5] Автором была произведена оценка влияния нагрузок, действующих в момент усиления, и эксцентриситетов, появляющихся в результате усиления на несущую способность усиленных стержней. Также было подтверждено перераспределение напряжений в сечении усиленного элемента при дальнейшем после усиления увеличении нагрузки.

Также Б.И. Десятовым совместно с А.Г. Иммерманом была разработана методика расчета несущей способности сжатых и растянутых элементов[9], вошедшая в «Руководство по усилению элементов металлоконструкций с применением сварки» [23]. В данных рекомендациях проверка устойчивости сжатых усиленных стержней ведется по формуле (1.6.) (табл. 1), где $\varphi_{\text{ait}}^{\circ}$ — минимальный коэффициент продольного изгиба усиленного стержня; F — площадь усиленного сечения. Данная методика расчета позволяет учесть возможность отрицательного влияния сварочного процесса на усиленный элемент стержня, отражающим на уменьшении величину несущей способности. Таким образом она отражает действительную работу усиленного элемента. В данных работах был поднят вопрос только об отрицательных воздействиях сварки на элементе, однако сварочный процесс — что даёт повод говорить о целесообразности поиска технологий сварки, улучшающих работу стержней как в процессе их усиления, так и усиленных.

В работе[5] Б.И. Десятовым был рассмотрен вопрос порядка наложения сварных швов при присоединении элементов усиления к стержням. Наиболее совершенным был предложен вариант с наложением сварных швов от концов к середине. Также Б.И.Десятовым совместно с А.Г.Иммерманом,

предлагается иной вариант порядка наложения сварных швов- от середины к концам. Этот способ сварки был разработан с целью уравнивания деформаций в усиленном стержне. Вопросы о влиянии последовательности наложения, протяженности и катетов сварных швов на напряженно-деформированное состояние сжатых стержней не рассматривался.

Сварка непременно, уже в момент усиления, влияет на работу усиливаемых стержней. В этой связи очевидно, что отсутствие в [5] 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 1.7, 1.8, табл. 1).

Экспериментальные исследования работы сжатых усиленных образцов, проведенные Б.И. Десятовым[5], показали что, в процессе наложения сварных связующих швов, происходило нарастание прогиба и потери устойчивости усиливаемого стержня, из-за того, что последующие сварные швы были наложены без остывания предыдущих. В связи с этим при испытании остальных образцов во 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. Установка распорок искажает картину работы усиливаемых стержней в процессе усиления и не даёт возможности оценить действительное влияние, которое оказывает наложение связующих сварных швов на поведение сжатых стержней в процессе их усиления и в дальнейшем при увеличении нагрузки.

Обращаясь к работам Десятова Б. И. [5,9], можно увидеть, что не подвергались исследованию вопросы, касающиеся влияния производимого усиления отдельных стержней на работу остальных элементов фермы, и на работу усиливаемой конструкции в целом в том числе.

Целью экспериментальных и теоретических исследований Реброва И. С. [17,18] является решить проблемы устойчивости и прочности сжатых стержней стальных конструкций, которые были усилены под нагрузкой.

Например, автором [17,18] подверглись рассмотрению вопросы напряженно–деформированного состояния центрально и внецентренно сжатых стержней стальных стропильных ферм, симметрично и несимметрично усиленных под нагрузкой.

Автор также подвергает анализу особенности напряженно–деформированного состояния *усиливаемых элементов* стальных конструкций, основываясь на численные расчеты (программа «RIG»). Безошибочность работы данной программы можно подтвердить большим числом тестовых расчетов: а конкретно, автора подтверждает сопоставление данных о развитии сварочных напряжений и деформаций на примере сварки полос, тавров, двутавров, коробчатых сечений, экспериментально исследованных в ИЭС им. Е.О.Патона. Подобный подход, в указанном случае, не является достаточно корректным: развитие сварочных напряжений и деформаций в ненапряженных элементах заметно отлично от случаев сварки элементов с начальными напряжениями от нагрузки.

И.С. Ребров приводит пример результатов *расчетного* (при помощи программного комплекса «RUSS»)анализа, особенности работы усиливаемых стержневых конструкций. О факте увеличения прогибов ферм при усилении их сжатых поясов автор делает вывод. Данный, полученный теоретическим путем, результат не имеет экспериментального подтверждения автором, на конструкции.

И.С. Ребров акцентирует, 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».

Основываясь на исследованиях Реброва И.С. [17,18], была предложена методика, как рассчитывать устойчивость усиленных сжатых элементов (формула 1.9, табл. 1). В данной методике была предпринята попытка учесть отрицательное влияние остаточных сварочных прогибов на работу стержней после усиления: прогибы от сварки были учтены только как увеличивающие эксцентриситеты, которые имелись в сжатых элементах.

Весьма значительные по размеру экспериментальные исследования были выполнены И.С. Ребровым на примере стержневых моделей и натуральных стержней. Конкретное внимание в данных исследованиях было отведено вопросам, касающимся технологии проведения усиления (сварки). Во время проведения эксперимента по концам, сплошными швами были присоединены усиливающие элементы, и в промежутках - прерывистыми (коэффициент прерывистости от 0,2 до 0,3). Порядком наплавки выступало направление снизу-вверх: нижние сплошные, за ними связующие прерывистые, завершающими – сплошные верхние, концевые. Таким образом, в результате эксперимента, была рассмотрена только одна из существующих технологических схем.

Ребровым И. С. [17] был сделан вывод о реальности «проведения усиления сжатых стержней при начальной нагрузке, не превышающей наименьшую расчётную критическую для сжатого стержня без введения дополнительных коэффициентов» (формулы 1.10, 1.11, табл. 1). Указанный вывод, в этом случае, является некорректным. Величина данной нагрузки в большей степени, находится в зависимости от технологических параметров усиления (сварки): величины сварных швов, порядка их наплавки (и по сечению, и по длине). И на примере теории, и на примере эксперимента, данные вопросы автором не были исследованы.

В указанном случае, некорректность подобного вывода была отмечена и научным редактором [17], профессором, доктором технических наук, Лащенко М. И., который подчеркнул в своем редакционном примечании

следующее: «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».

Также, стоит акцентировать внимание на том, что [17,18] не подвергался экспериментальному исследованию вопрос о работе сжатых стержней, усиливаемых в составе ферм. Не подвергался исследованию и вопрос, касающийся влияния производимого усиления на работу остальных элементов ферм (примыкающих фасонок, смежных стержней).

Связанные с усилением под нагрузкой сжатых элементов ферм И.К.Родионовым были выполнены теоретические исследования влияния сварочных режимов технологий на напряженно–деформированное состояние нагруженных стержней стальных ферм [19-22]. Также автором получены критерии определения предельных уровней напряжений сжатия и растяжения в стержневых элементах ферм, при которых возможно их усиление с применением сварки.

Также в работах[19,20] были описаны методики определения тепловых ослаблений сваркой сечений сжатых и растянутых элементов стальных ферм.

Разработанные рекомендации в [19-22] автором, позволяют применять безопасные сварочных технологий усиления эксплуатируемых стальных ферм.

В[19]разработаны рациональные сварочные технологии усиления стержней ферм при максимально возможном уровне нагружения металла стальных ферм.

1.4 Вывод по разделу 1

Основными причинами аварий стальных конструкций часто являются несовершенства геометрии стержней ферм. Повышение объема, технологическое увеличение воздействий и интенсификация промышленного производства обычно связано с ростом нагрузки на элементы и конструкции, что, как следствие, обуславливает необходимость увеличения несущей способности за счет усиления конструкции. Усиление следует осуществлять при действии эксплуатационных нагрузок, что сводит простой технологического оборудования к минимуму. Распространенным методом усиления является увеличение сечения элементов конструкции присоединением к ним дополнительных элементов на сварке. К настоящему времени наиболее неисследованным является вопрос усиления сжатых стержней ферм, имеющих начальные местные деформации.

В этой связи **целью данной диссертации** является получение начальной информации о влиянии схем и нагрузки усиления на работу сжатых стержней из парных уголков с местным размалкованием полков, усиливаемых с применением сварки.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи экспериментального и теоретического характера**:

1. Испытание эталонных стержней (без деформаций).
2. Испытание деформированных стержней без усиления.
3. Испытание деформированных стержней с усилением под нагрузкой.
4. Теоретическое обоснование полученных экспериментальным путем результатов.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЖАТЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СТЕРЖНЕЙ, УСИЛИВАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРКИ

2.1 Методики проведения испытаний сжатых стержней

Цель испытания стержневых моделей: получить информацию о действительной работе центрально-сжатых стержней из парных уголков с местным размалкованием полок, усиливаемых увеличением сечения с применением сварки.

Стержни-модели представляли собой образцы таврового сечения, выполненные из двух уголков 2L32x4. Геометрическая длина образцов составляет 950мм. Опытные образцы были изготовлены таврового сечения (рис.4) в количестве 15 шт. Из них – 12 шт. изготовлены с первоначальными деформациями. (характер и величина приведены в таблице 2).

Образцы изготавливались в следующем порядке:

1.путём сварки отрезков 2L32x4 с фасонками и прокладками получали стержни;

2.часть стержней (см. ниже), используя специальные приспособления будет деформировались, местно размалковывались одна из полок с погибью $f=15\text{мм}$;

Все образцы в количестве 15 штук были поделены на три серии: первую, вторую и третью.

Образцы первой серии в количестве 3 штук выполнялись прямые и использовались в качестве эталонных (рис.7,8).

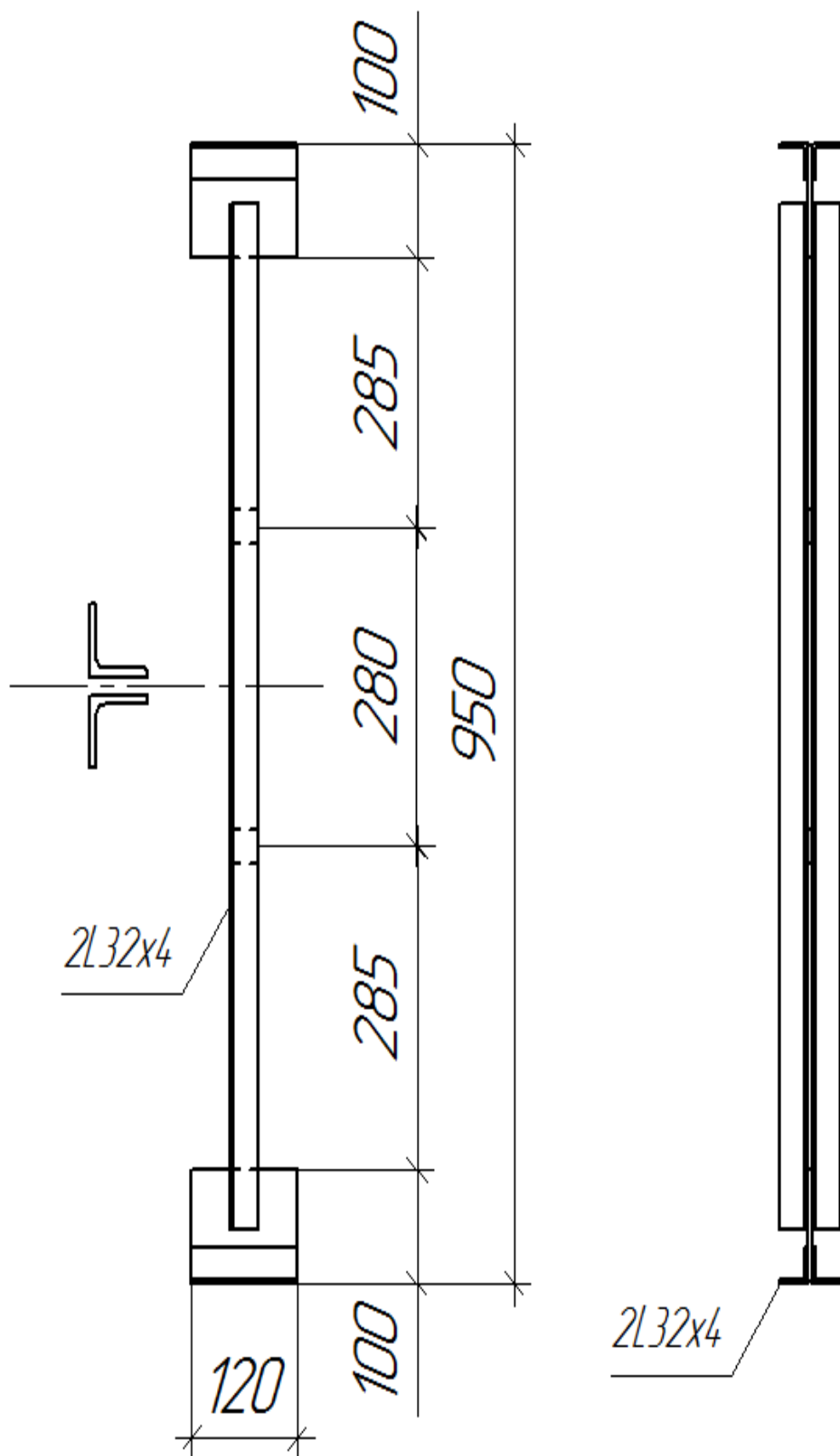


Рисунок 7 - Сжатый стальной стержень из парных уголков без деформаций



Рисунок 8 - Вид эталонного стержня до испытаний

Образцы второй и третьей серии были изготовлены с деформациями, а именно с размолкованием одной из полок уголка (рис.9,10).

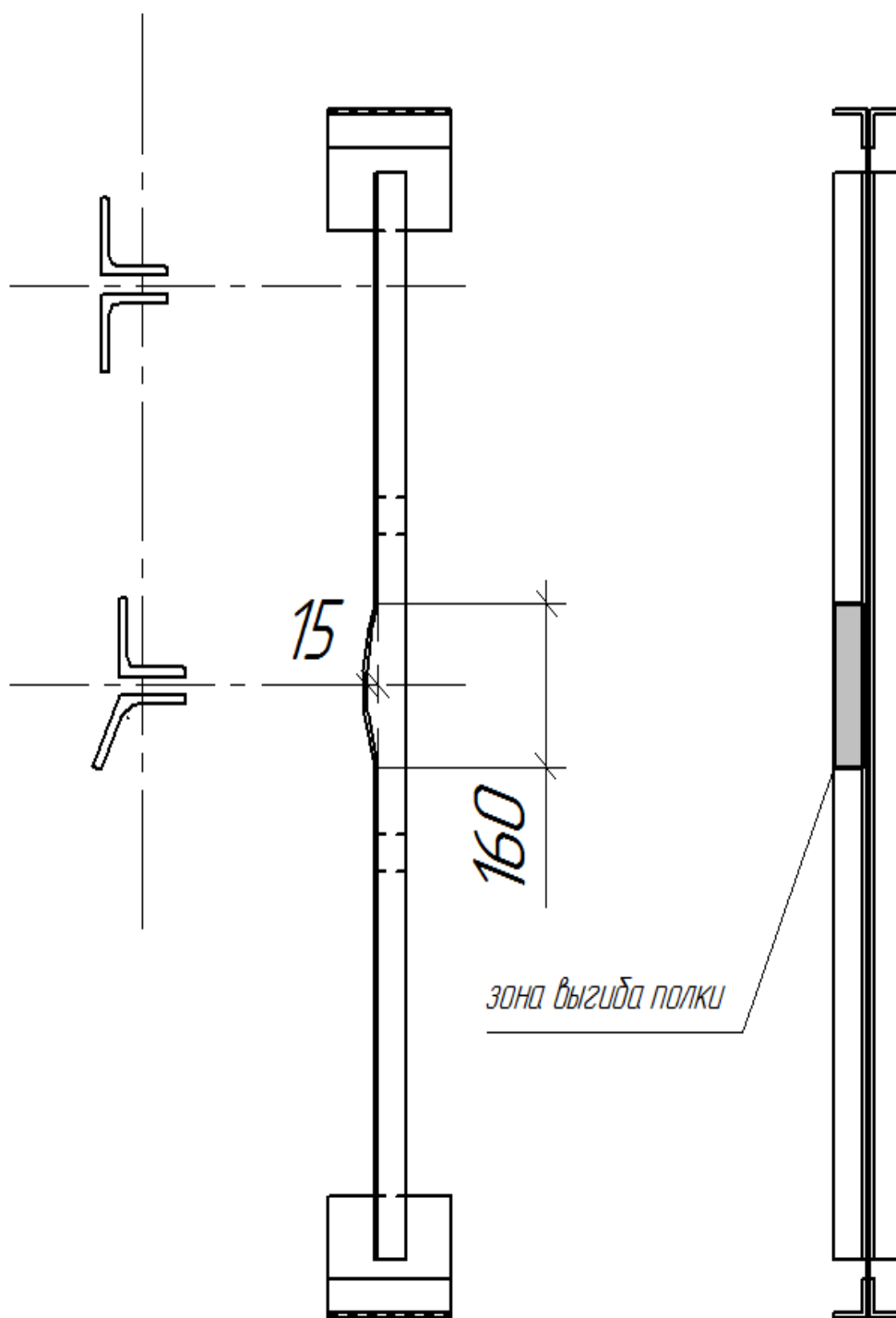


Рисунок 9 - Деформированный сжатый стержень с выгибом одной из полок уголка



Рисунок 10 - Вид деформированного стержня до испытаний

В качестве элементов усиления применялись полосы и уголки из стали соответствующие по прочности основным стержням, длиной 240 мм.

По результатам механических испытаний материал уголков был классифицирован, как сталь класса С375 и марки 12Г2С по ГОСТ 27772-88.

Испытание стержневых моделей проводилась на 250-тонном прессе П-250 с наибольшим расстоянием 1000мм.

Методики проведения испытания были различны для стержней различных серий.

Испытание стержней 1-й и 2-й серий проводилось в следующем порядке: стержень устанавливался между опорами пресса, осуществлялось центрирование с помощью отвеса, после чего производилось нагружение ступенями по 250 кг до потери устойчивости. Потеря устойчивости определялась по моменту появления изгибных деформаций. По шкале пресса определялась критическая нагрузка.

Усиление стержней 3 серии с местным размалкованием полки одного из уголков производилось приваркой в зоне прогиба пластины или уголка, шириной равной полке основного уголка (рис.11,12). Технические решения приведены на рисунках 11 и 12.

Согласно схеме усиления, пластина или уголок приваривались к деформированной выгнутой полке уголка длиной несколько больше волны погиби.

Усиление выполнялось в двух различных случаях:

- привариванием элемента усиления без нагрузки;
- привариванием элемента усиления под нагрузки.

Нагрузка усиления равнялась 4200 кг, что составляет 60% несущей способности деформированного сжатого стержня.

Катет и длина сварных швов составляли $h_{ш}=4\text{мм}$ и $l_{ш}=40\text{мм}$. Сварка велась вручную электродами типа Э-46.

В процессе испытаний для всех стержней-моделей производилась фиксация величин критических сил по измерительной шкале прессы.

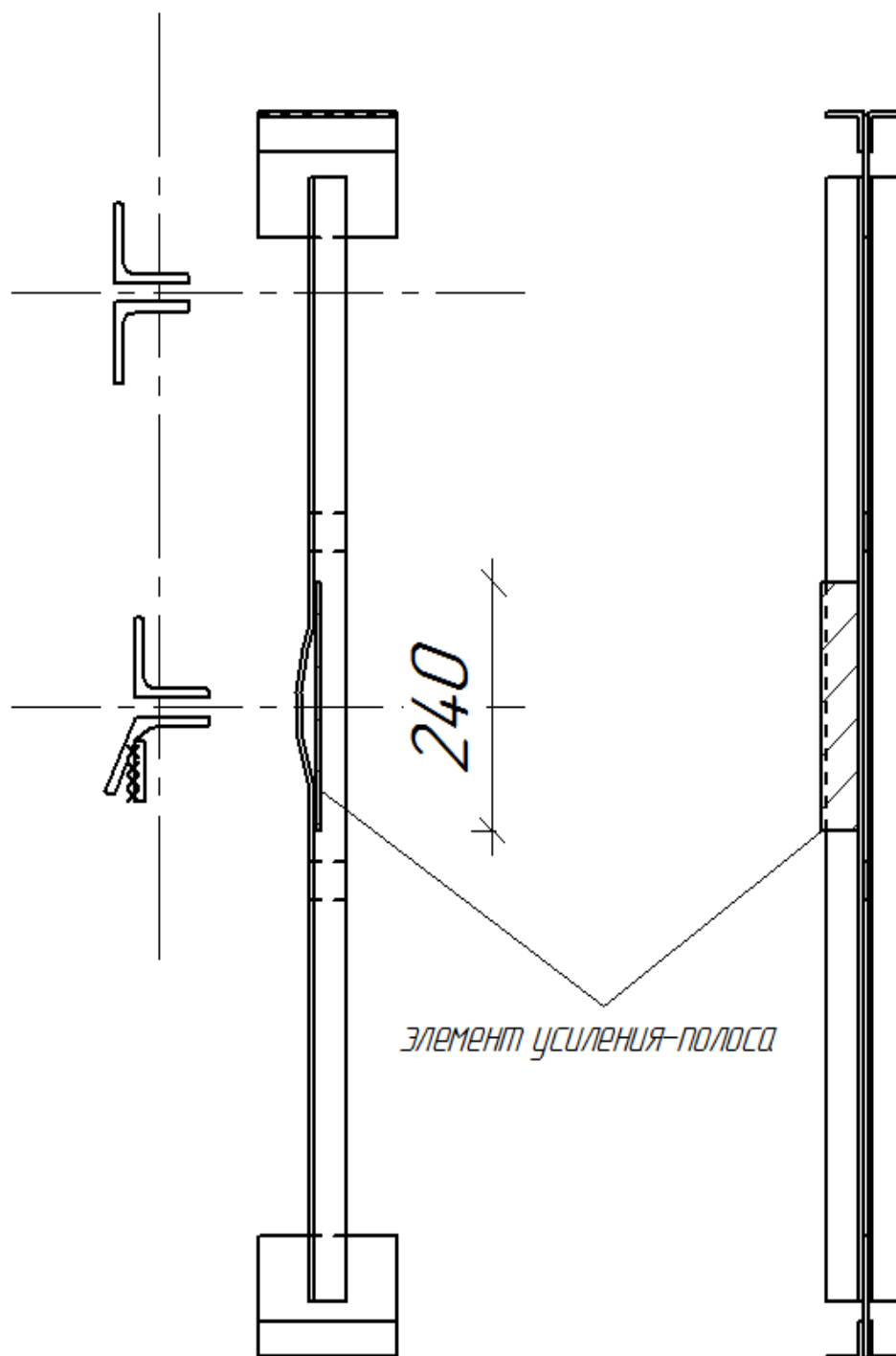


Рисунок 11 - Техническое решение усиления сжатого стержня полосой

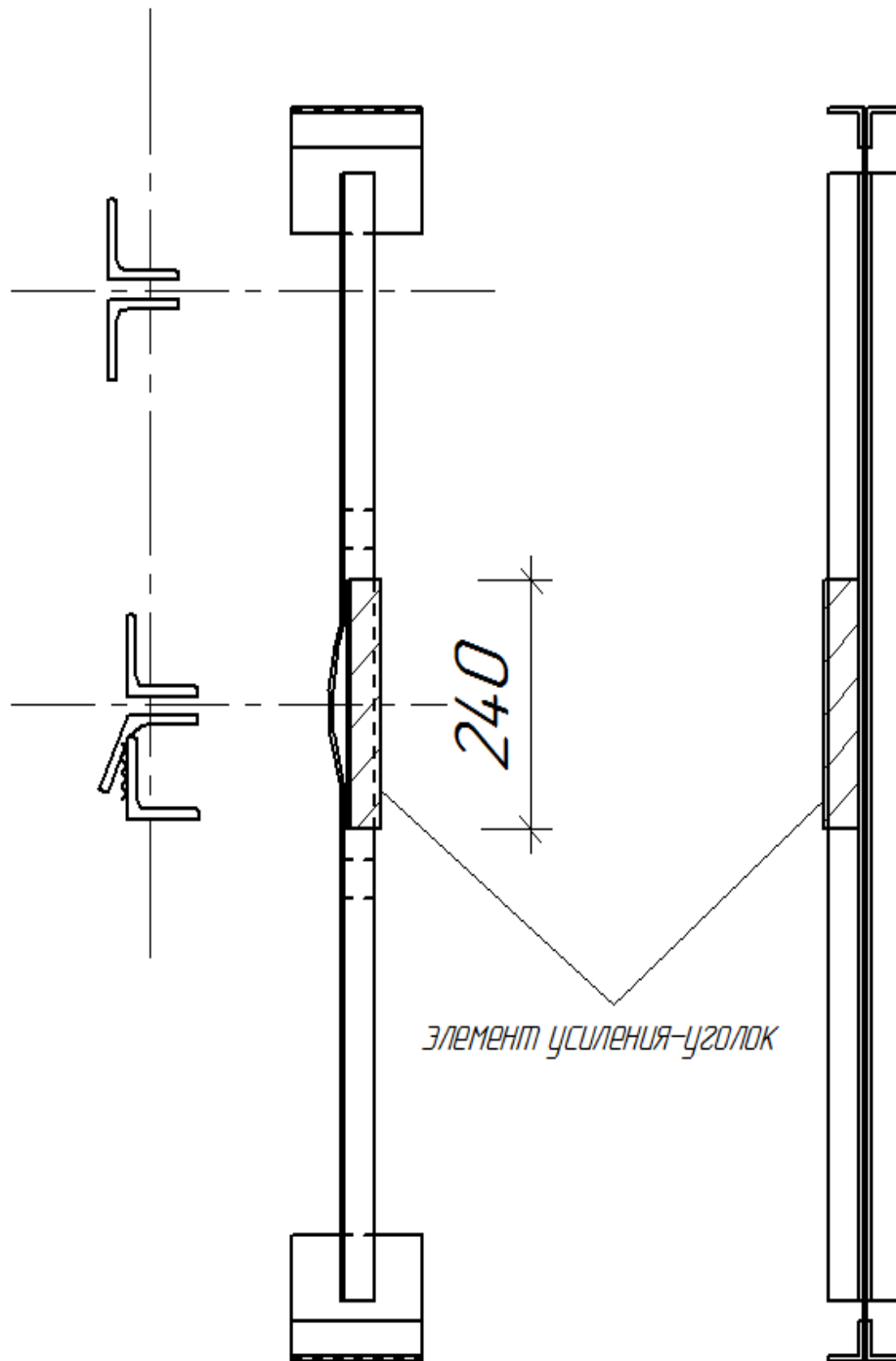


Рисунок 12 - Техническое решение усиления сжатого стержня уголком

2.1 Результаты испытаний сжатых стержней

Испытание стержней 1-й серии проводилось в следующем порядке: стержень устанавливался между опорами прессы (П-250), осуществлялось центрирование с помощью отвеса, после чего производилось нагружение

ступенями по 250 кг до потери устойчивости. Потеря устойчивости определялась по моменту появления изгибных деформаций. По шкале прессы определялась критическая нагрузка. Схема установки для испытания образцов с эталонными стержнями таврового сечения представлена на рис.13.

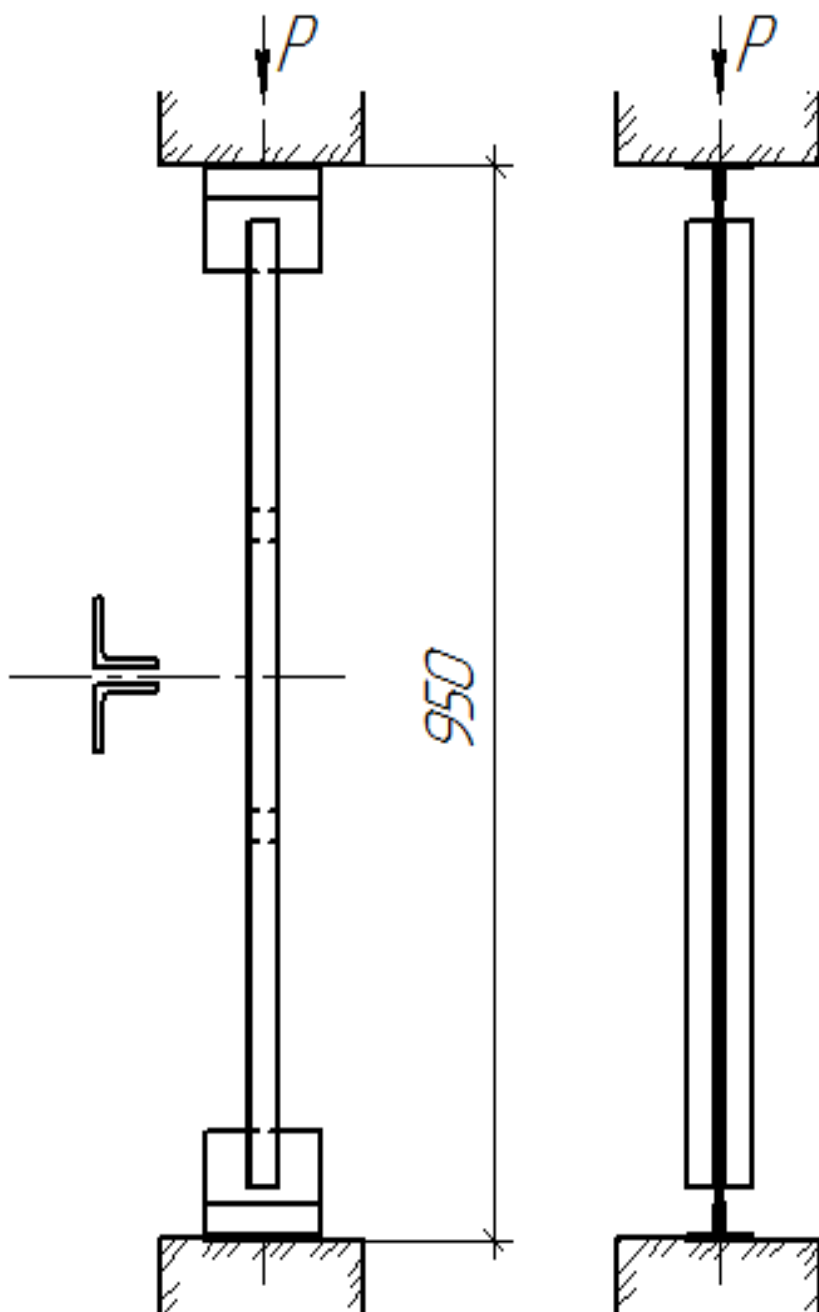


Рисунок 13 - Схема установки для испытания образцов с эталонными стержнями таврового сечения

Результаты испытаний дали следующие результаты:

– максимальная критическая сила при испытании стержней 1-й серии – 10450 кг (разброс в пределах – 7%);

Вид испытанных образцов 1-й серии представлены в приложении А (рис. А.1, А.2).

Испытание стержней 2-й серии, деформированных с одной из полок уголков, похоже с испытаниями эталонных стержней. Вид стержней испытанных до нагружения и потерявших устойчивость представлены в приложении Б (рис. Б.1, Б.2).

Результаты испытаний дали следующие результаты:

– максимальная критическая сила при испытании стержней 2-й серии – 6880 кг (разброс в пределах – 4%);

Стержни второй серии теряли устойчивость в плоскости наименьшей жесткости, а именно в плоскости размалкованной полки уголка (изгибная форма потери устойчивости).

Выгнутая (размалкованная) полка фактически выпадает из работы сечения, приводя стержень к состоянию внецентренного сжатия. Отсюда при выборе схемы усиления необходимо было компенсировать потерю площади в сечении и по возможности выпрямить ось стержня.

Схема установки для испытания образцов деформированных стержней усиленных полосой и уголком таврового сечения представлены на рисунках 14 и 15. Стержни усиленные не под нагрузкой устанавливались между опорами пресса и нагружалась при постоянной скорости нагружения до потери устойчивости.

Максимальная критическая сила стержней усиленных полосой- 9615 кг. Критическая сила усиленного стержня была больше критической силы неусиленного деформированного (9615 кг > 6880 кг), однако оказалась меньше эталонного (9615 кг < 10380 кг), что показывает на определенную

степень недостаточности усиления: потеря несущей способности составляет около 7%.

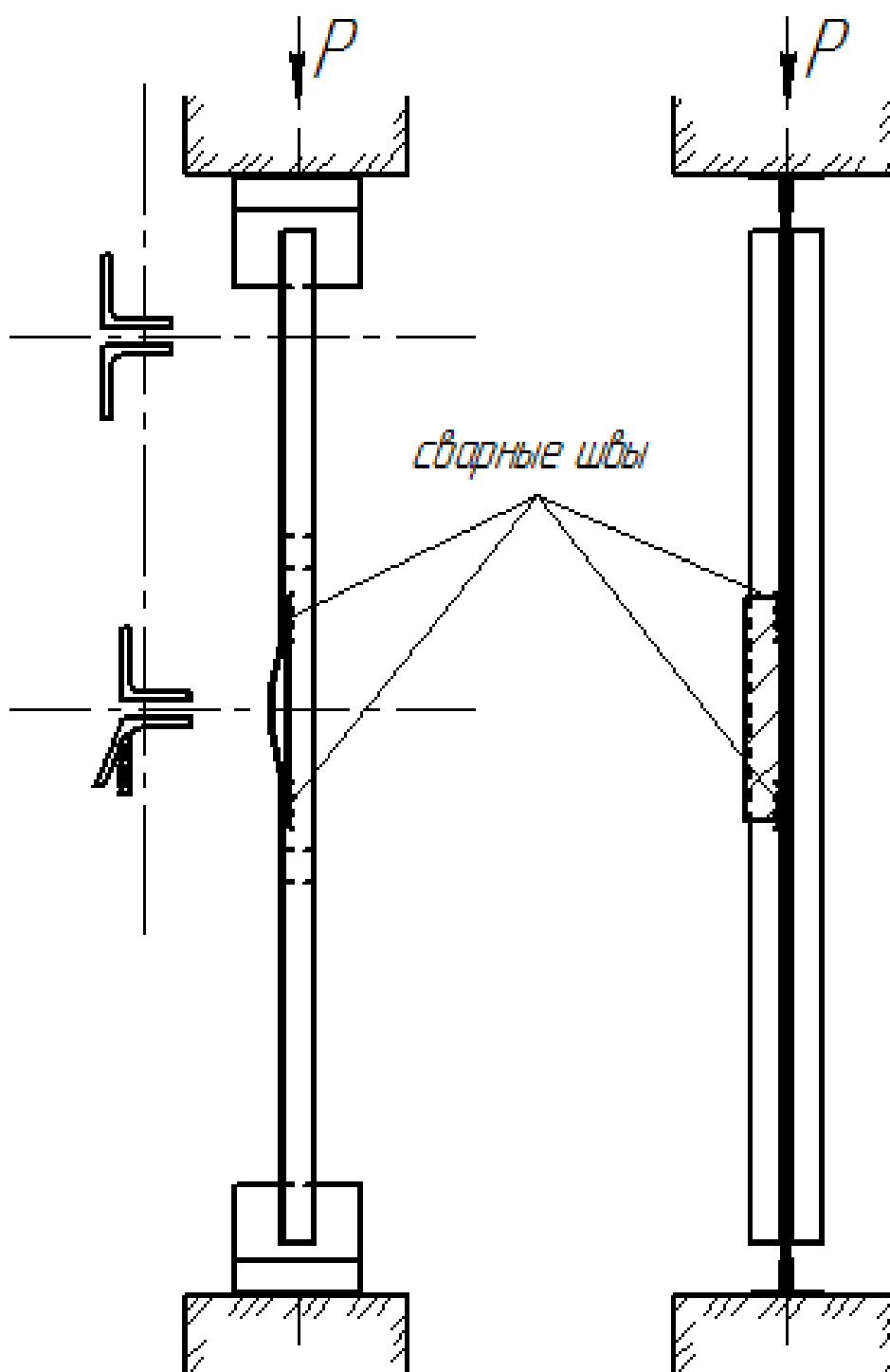


Рисунок 14 - Схема установки для испытания образцов с усилением полосой

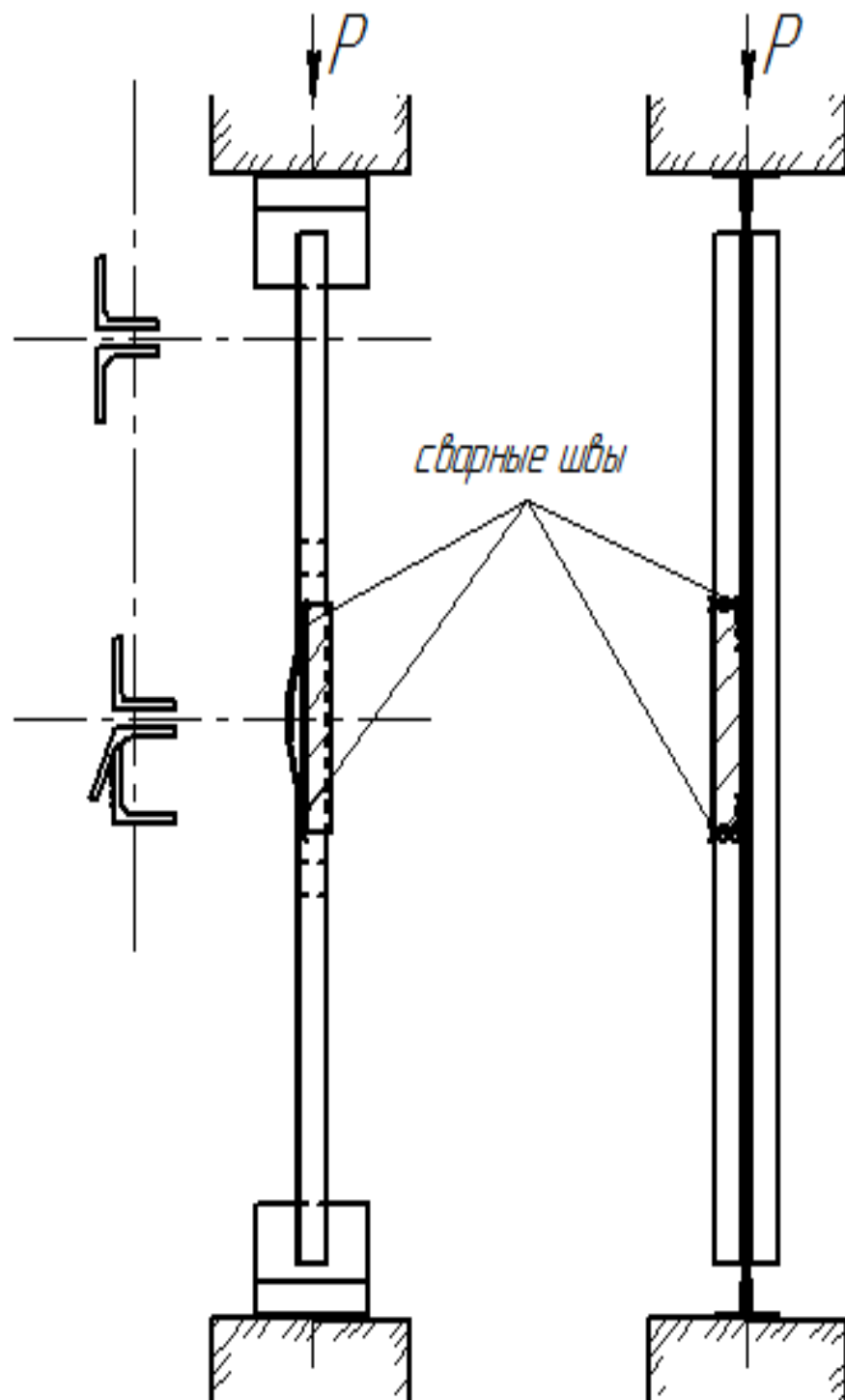


Рисунок 15 - Схема установки для испытания образцов с усилением
уголком

Максимальная критическая сила стержней усиленных уголком (без нагрузки) - 10750кг, что показывает приблизительно равные показания при испытании эталонных стержней (10750кг>10380кг).

Вид деформированных стержней, усиленных уголком и полосой представлены в приложении В (рис. В.1-В.5).

Испытание усиливаемых уголком стержней под нагрузкой проводилось в следующем порядке:

- стержни устанавливались между опорами прессы;
- наносились метки для определения мест приварки элементов усиления;
- нагрузка доводилась до 4200кг и поддерживалась гидравликой;
- с помощью трубочин уголок усиления приставлялся к меткам и прихватывался;
- накладывались сварные швы ;
- после остывания образца до 60-80°С нагрузка доводилась до потери устойчивости образца.

Результаты испытаний усиленных уголками стержней:

- максимальная критическая сила стержней, усиленных под нагрузкой- 10625кг
- максимальная критическая сила стержней, усиленных под нагрузкой, незначительно больше максимальной критической силы эталонных стержней (10625 кг и 10300 кг).

Вид деформированных стержней, усиленных уголком под нагрузкой представлены в приложении Г (рис. Г.1, Г.2).

Потеря несущей способности 3 серии образцов происходила в результате потери ими общей устойчивости, при испытаниях не было зафиксировано ни одного случая среза сварных швов. Потеря устойчивости элемента имела четкую выраженную изгибную форму. Общие данные по испытанию сжатых стальных стержней представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Среднестатистические значения измеренных величин разрушающих нагрузок по сериям образцов

№ серий	Вид начальных деформаций стержней	Количество стержней в серии	Наличие усиления	Максимальная критическая сила стержня, кг	
				усиленного без нагрузки	усиленного под нагрузкой
1	Без деформаций	3	нет	10450	-
2	Местное размолкование полки с $f=15$ мм	3	нет	6880	-
3		3	Усиление полосой	9615	-
		6	Усиление уголком	10625	10300

2.3 Выводы по разделу 2

1. Местные деформации полков значительно снижают несущую способность сжатых тавровых стержней из парных уголков.
2. При усилении сжатых стержней с местными деформациями следует стремиться к компенсации потерянной части сечения и снижению величины эксцентриситета.
3. При усилении можно найти рациональный вариант путем применения элементов усиления разного сечения.
4. Величина нагрузки усиления незначительно влияет на несущую способность усиленного элемента.

3 АНАЛИЗ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Определение несущей способности сжатого недеформированного стержня

Потеря устойчивости эталонных стержней происходила в плоскости перпендикулярной плоскости соединительных прокладок.

Это в принципе противоречит работе сжатого стержня из двух равнополочных уголков реальной фермы, аналогичные стержни теряют устойчивость в плоскости перпендикулярной оси «х».

Причина очевидно кроется в заземлении стержней в плоскости, перпендикулярной оси «х», что определяется характером опор (имитация поясов), далеких от шарнирных.

В этой связи в первом приближении была принята расчетная схема стержня с жесткими опорами в плоскости, перпендикулярной плоскости оси «х» и шарнирными в плоскости перпендикулярной оси «у».

Геометрические характеристики сечения из двух уголков 2L32x4:

площадь сечения:

$$A = 2 \cdot 2,43 = 4,86 \text{ дм}^2, \quad (3.1)$$

радиус инерции $i_x = 0,96 \text{ см}$;

радиус инерции $i_y = 1,5 \text{ см}$;

геометрическая длина стержня $l_0 = 95 \text{ см}$;

предел текучести принята равным: $\sigma_m = 37,5 \text{ кН / см}^2$.

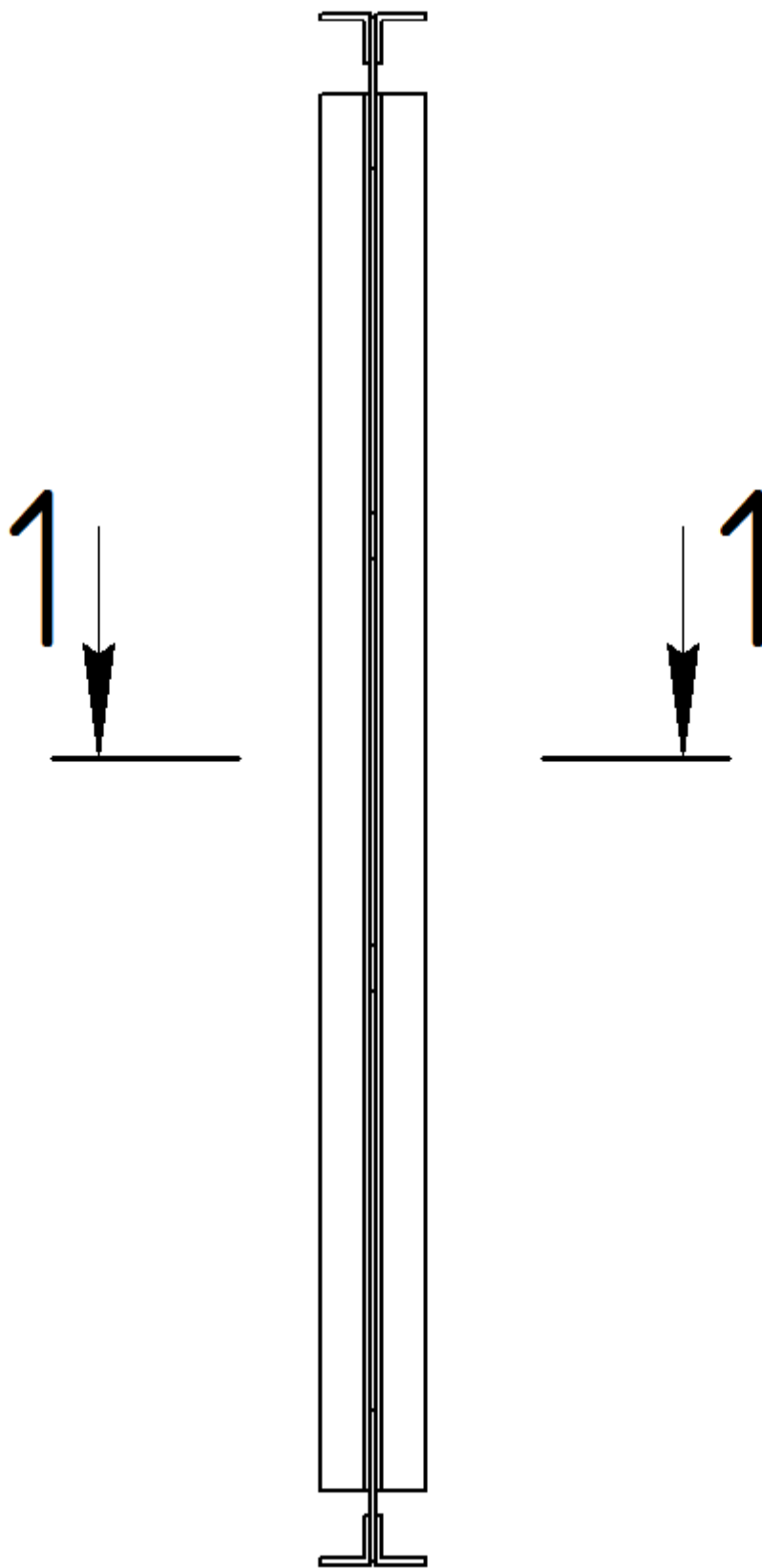


Рисунок 16 - Вид эталонного стержня 1-й серии

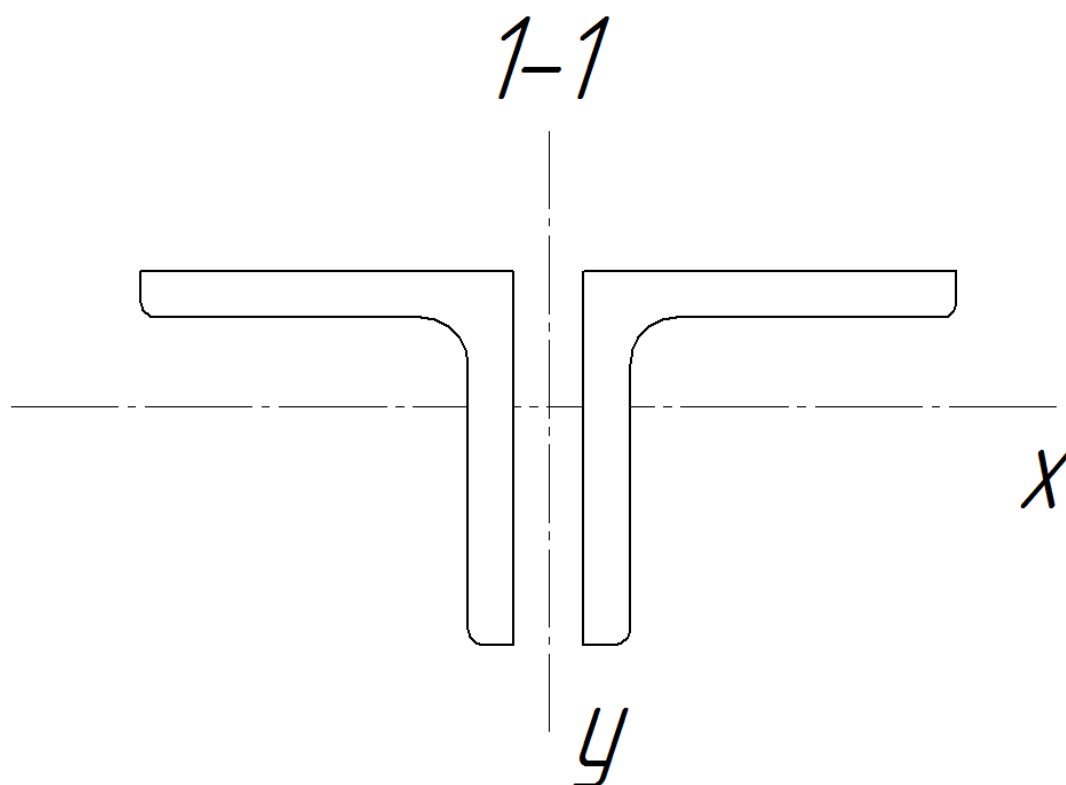


Рисунок 17 - Сечение стержня в плоскости, перпендикулярной оси «у»

Результаты расчета несущей способности:

гибкость в плоскости перпендикулярной оси «х»:

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{0,5 \cdot l_x}{i_x} = \frac{0,5 \cdot 95}{0,96} = 49,5; \quad (3.2)$$

гибкость в плоскости перпендикулярной оси «у»:

$$\lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{95}{1,5} = 63,3; \quad (3.3)$$

приведенная гибкость определяется как:

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_{\max} \sqrt{\frac{\sigma_y}{A}} = 63,3 \sqrt{\frac{37,5}{2,1 \cdot 10^4}} = 2,67. \quad (3.4)$$

коэффициент продольного изгиба для данного вида сечения определяется по приложения 8[25]: $\varphi = 0,622$

Несущая способность стержня определяется как:

$$[N] = \varphi \cdot A \cdot \sigma_0 = 0,622 \cdot 4,86 \cdot 3750 = 11135 \text{ êã.} \quad (3.5)$$

Теоретически рассчитанная величина несущей способности больше величины полученная экспериментальным путем ($N = 11135\text{кг}$). Разброс в пределах 7%, что для постановочного эксперимента вполне допустимо.

3.2 Определение несущей способности сжатого деформированного стержня

Деформированный стержень представляет собой стержень с размалкованной полкой $f = 15\text{мм}$ одного из уголков (рис. 18).

$$y_{\bar{n}\delta} = e_y = \frac{\Sigma S_x}{\Sigma A} = \frac{3.2 \cdot 0.4 - 2.8 \cdot 0.4 \cdot 0.86}{(3.2 \cdot 0.4 + 2.8 \cdot 0.4)} = 0.365 \text{ ñì.} \quad (3.6)$$

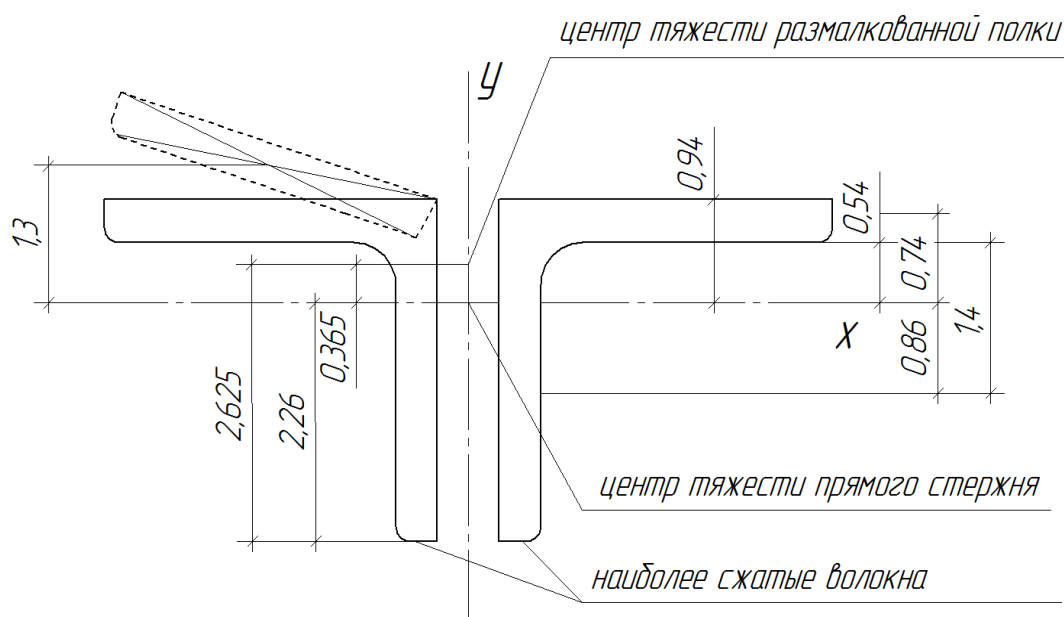


Рисунок 18 - Определение смещения центра тяжести по оси «у»

Момент сопротивления наиболее сжатого волокна сечения относительно оси «х» определяется как:

$$W_x = \frac{I_x}{y_c} = \frac{2 \cdot 2.26}{2.26} = 2\tilde{n}^3. \quad (3.7)$$

Приведенный эксцентриситет сечения:

$$m = \frac{e_y \cdot A}{W_x^c} = \frac{0,365 \cdot 4,8}{2} = 0,876. \quad (3.8)$$

Относительный эксцентриситет $m_{ef} = \eta \cdot m$, где η – коэффициент влияния формы сечения, определяемый по табл. 73 [25].

Определяем коэффициент φ_e по табл. 74 [25] как функцию условной гибкости $\bar{\lambda}$ и относительного эксцентриситета $m_{ef} = 1.192$.

Для рассматриваемого случая принимаем тип сечения девять и для отношения $A_f / A_w \geq 1.0$ определяем коэффициент η как:

$$\eta = (1.5 - 0.1 \cdot m) - 0.02 \cdot (5 - m) \bar{\lambda} = (1.5 - 0.1 \cdot 0,876) - 0.02 \cdot (5 - 0,876) \cdot 2,67 = 1,192. \quad (3.9)$$

Тогда относительный эксцентриситет будет равен:

$$m_{ef} = \eta \cdot m = 0,876 \cdot 1,192 = 1,04. \quad (3.10)$$

Определяем коэффициент φ_e по табл. 74 [18] как функцию условной гибкости $\bar{\lambda}$ и относительного эксцентриситета $m_{ef} = 1.192$:

$$\varphi_e = 0,434. \quad (3.11)$$

Несущая способность деформированного стержня определяется как:

$$N = \varphi_e \cdot A \cdot \sigma_d = 0,434 \cdot 4,86 \cdot 3750 = 7909 \text{ êã}. \quad (3.12)$$

Что также как и в случае эталонных стержней, больше экспериментально полученной величины ($N=6880$ кг).

3.3 Обоснование величины предельно-допустимой нагрузки при усилении с применением сварки стержней с местными погибами полок

Наплавка швов при сварке приводит к появлению усадочной силы и теплового разогрева металла. Усадочная сила воздействует на свариваемый элемент, вызывая временные и остаточные деформации. Разогрев металла в момент сварки ослабляет сечение. В случае местного усиления сжатых стержней путем присоединения отдельных пластин. Основным моментом, влияющим на работу усиливаемого стержня, будет тепловое ослабление сечения, то есть выпадение части его, разогретой выше расчетной температуры, величина которой для стали принимается равной $T_p = 600^\circ C$.

Таким образом, задача определения предельно-допустимой нагрузки при усилении может быть сведена к задаче определения критической силы усиливаемого стержня с учетом уменьшения его сечения и смещения его центра тяжести, то есть:

$$N = \varphi_e \cdot A_{nt} \cdot \sigma_m, \quad (3.13)$$

где A_{nt} - площадь сечения, определяемая с учетом теплового ослабления;

φ_e - коэффициент, определяемый с учетом смещения центра тяжести сечения;

σ_δ - предел текучести стержня.

Определение A_{nt} производится согласно методу [8] как:

$$A_{nt} = A - A_{ce}, \quad (3.14)$$

где A - площадь сечения стержня до сварки;

$A_{св}$ - площадь сечения, разогретого свыше $T_p = 600^{\circ}C$.

3.4 Расчет нагрузки, предельно допустимой для усиливаемого деформированного стержня

Принимаем минимальный катет шва $k_f = 4\text{ мм}$. Определяем требуемые характеристики режима сварки:

погонное тепловложение определяется как:

$$q_n = 15000 \cdot A_n = 15000 \cdot k_f / 2 = 1200 \text{ кал / см.} \quad (3.15)$$

применяем ток $I=180\text{ А}$, напряжение $U=18\text{ В}$, тогда скорость определяется из выражения $q_n = \frac{0,24 \cdot \eta \cdot U \cdot I}{V}$:

$$V = \frac{0,24 \cdot \eta \cdot U \cdot I}{q_n} = \frac{0,24 \cdot 0,7 \cdot 18 \cdot 180}{1200} = 0,252 \text{ м / мин} = 25,2 \text{ мм / мин} \quad (3.16)$$

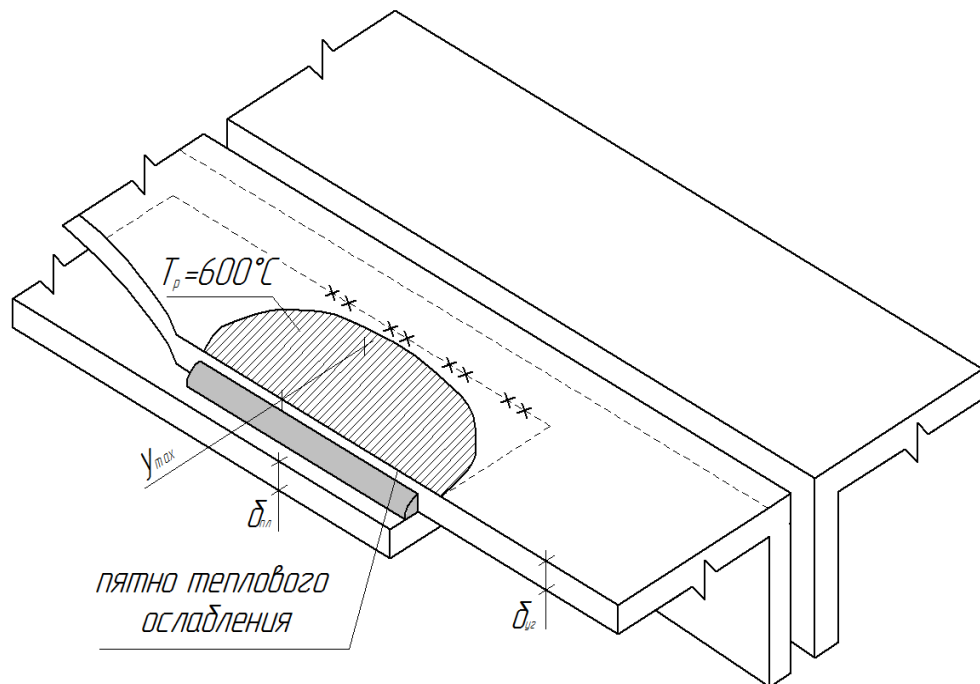


Рисунок 19 - Тепловое ослабление усиливаемого стержня

При равных толщинах элементов (полка уголка и пластина усиления) тепловая энергия распределяется поровну, то есть:
 $q_n^0 = 1200 \text{ кал / см}, q_n^y = 1200 \text{ эдэ / нн} .$

Ширина пятна ослабления основного элемента определяется как (рис. 20):

$$x_{c\grave{a}}^0 = \frac{q_n^0}{3200 \cdot \delta_0} = \frac{1200}{3200 \cdot 0,4} = 0,93 \text{ см} \approx 1,0 \text{ нн} . \quad (3.17)$$

Таким образом, сечение стержня в момент сварки равно:

$$A_{nt} = A - A_{\grave{n}\grave{a}} = 4,8 - 2,0 \cdot 0,4 = 4,0 \text{ нн}^2 . \quad (3.18)$$

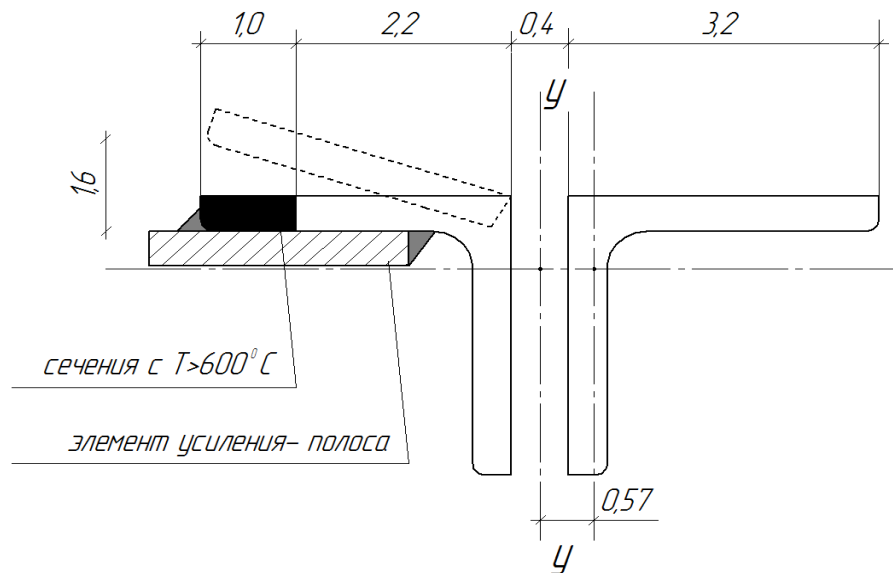


Рисунок 20 - Сечение усиленного деформированного стержня

Определяем смещение центра тяжести в направлении оси «х»:

$$x_{ц.м.} = \frac{\Sigma S_y}{\Sigma A} ; \quad (3.19)$$

$$\Sigma S_y = 2,2 \cdot 0,4 \cdot 1,5 - 3,2 \cdot 0,4 \cdot 2 = 1,24 \text{ см}^3 ; \quad (3.20)$$

$$\Sigma A = (2,2 + 3,2) \cdot 0,4 = 2,16 \text{ см}^2 ; \quad (3.21)$$

$$\bar{\sigma}_{\sigma.д.} = \frac{1,24}{2,16} = 0,57 \text{ нн} = \bar{\sigma}_{\sigma}^{\text{нн}} . \quad (3.22)$$

Приведенный эксцентриситет определяется как:

$$m_{.x.} = \frac{A \cdot e_x^{ni}}{W_y^e}. \quad (3.23)$$

Момент сопротивления наиболее сжатого волокна относительно оси «у» определяется как:

$$W_y^c = \frac{I_y}{X_c} = \frac{10,948}{3,6} = 3,04 \text{ см}^4, \quad (3.24)$$

где I_y - момент инерции сечения относительно оси «у»;
 X_c - расстояние от оси «у» до наиболее сжатого волокна.

Приведенный эксцентриситет равняется:

$$m_x = \frac{0,57 \cdot 4,8}{3,04} = 0,9. \quad (3.25)$$

Определяем коэффициент влияния формы сечения как:

$$\eta = 1,8 + 0,12 \cdot m_x = 1,8 + 1,2 \cdot 0,9 = 1,9; \quad (3.26)$$

$$m_{ef} = 0,9 \cdot 1,9 = 1,71. \quad (3.27)$$

Коэффициент φ_e^x определяем в зависимости от величин $\bar{\lambda}$ и m_{ef} по табл. 74[25] и равняется: $\varphi_e^x = 0,379$.

Несущая способность стержня будет равняться:

$$N = \varphi_e^x \cdot \dot{A}_{nt} \cdot \sigma_{\dot{\delta}} = 0,375 \cdot 4,0 \cdot 3750 = 5625 \text{ êã}. \quad (3.28)$$

3.5. Выводы по разделу 3

1. Полученные в результате расчета величины критических сил довольно точно для постановочного эксперимента соответствуют величинам, полученным экспериментальным путем:

– теоретические и экспериментальные величины критических сил эталонных стержней составляют соответственно 11135 и 10450 кг;

– теоретические и экспериментальные величины критических сил стержней с начальными деформациями, не подвергающихся усилению составляют соответственно 7909 и 6880 кг;

2. Методика определения предельно допускаемой при усилении нагрузки довольно хорошо подтверждается экспериментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были 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. Разработана методика проведения усиления сжатых деформированных стержней с применением сварки;
4. Проведены экспериментальные исследования центрально-сжатых стержней из парных уголков с местным размалкованием полок, усиливаемых увеличением сечения с применением сварки;
5. Проведен анализ и теоретические обоснования полученных экспериментальных результатов;
6. Обоснована величина предельно-допустимой нагрузки при усилении с применением сварки стержней с местными погибами полок.

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

1. Начальные местные деформации размалкования сжатых стержней из парных уголков значительно влияет на их несущую способность: критические силы стержней с начальными деформациями были более чем на 30% меньше критических сил эталонных, прямых образцов.
2. При усилении центрально-сжатых стержней с местным размалкованием полок уголков следует стремиться к компенсации потерянного сечения и выпрямлению оси стержня.

3. Варьированием сечений элементов усиления можно получить рациональный вариант усиления: экспериментально установлено, что усиление уголковым элементом дает более высокую критическую величину нагрузки по сравнению с усилением полосой.
4. Проведенные расчеты несущей способности стержней в целом подтвердили экспериментально полученные результаты.
5. Теоретически получена основа методики определения предельно допустимой нагрузки при усилении с применением сварки сжатых стержней с размалкованной полкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Аугустин Я., Шледзевский Е., Аварии стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1978.
- 2 Бельский М.Р. Лебедев А.И. Усиление стальных конструкций. Киев: “Будівельник”, 1981. –120 с.
- 3 Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения Текст. / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. — М.: Стройиздат, 1968.-206 с.
- 4 Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. – М.: Стройиздат, 1987.- 220 с.
- 5 Десятов Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ, 1968.
- 6 Дмитриев Ф.Д., Крушение инженерных сооружений. – М.: Стройиздат, 1953.
- 7 Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление восстановление и ремонт. – М.: изд-во АСВ, 2012. 312 с.
- 8 Игнатьева В.С. Метод "фиктивных температур" как основа исследований в области напряженно деформируемого состояния сварных соединений. Металлические конструкции в строительстве. - Труды / МИСИ им. Куйбышева, 1979, №152, с. 71-88.
- 9 Иммерман, А.Г. Расчет усиленных под нагрузкой сжатых элементов сварных стальных ферм Текст. / А.Г. Иммерман, Б.И. Десятов // Металлические конструкции. Сб. тр. МИСИ. М.,1970.-№85.-С. 147-151.

- 10 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.
- 11 Лашенко М.Н., Аварии металлических конструкций зданий и сооружений. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1969. -184с.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Мизюмский И.А., Аварии и крушения стальных конструкций и исследование причин разрушения сварных стыков уголков. Кандидатская диссертация, ЛИСИ, 1959.
- 15 Москалев Н.С., Пронозин Я.А. Металлические конструкции. Учебник / М: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 344 с.
- 16 Пособие по проектированию усиления стальных конструкций / Укрниипроектстальконструкция.-М.: Стройиздат, 1989
- 17 Ребров И.С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой. – Л., «Стройиздат», 1976.
- 18 Ребров, И.С. Усиление стержневых металлических конструкций: Проектирование и расчет Текст. / И.С. Ребров. Л.: Стройиздат, 1988. — 288 с.
- 19 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.
- 20 Родионов И.К. О некоторых вопросах усиления методом увеличения сечения сжатых стержней стальных уголкового ферм. В межвуз. сб. науч. трудов «Наука, техника и образование Тольятти и Волжского региона», ч.2. Политехнический институт, 2000. С.165–169.
- 21 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.
- 22 Родионов И.К. Усиление сжатых стержней стальных ферм производственных зданий. «Сварочное производство» №4, 2009, с. 25-29.
- 23 Руководство по усилению элементов металлоконструкций с применением сварки. ЦНИИпроектстальконструкция. М.: 1979, 15 с.
- 24 Сахновский М.М., Титов А.М. Уроки аварий стальных конструкций. Киев: Будівельник, 1969, 200 с.
- 25 СНиП II-23-81 . Стальные конструкции / Госстрой СССР Текст. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1980. - 96 с.
- 26 Стрелецкий Н.С. Работа сжатых стоек, Госстройиздат, 1959.
- 27 Шкинев А.Н. Аварии в строительстве. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1984.
- 28 Ясинский Ф.С. Избранные работы по устойчивости сжатых стержней. М. - Л.: Гостехиздат, 1952. - 428 с

ПРИЛОЖЕНИЕ А



Рисунок А.1 - Вид эталонного стержня до испытания



Рисунок А.2 - Вид эталонного стержня после испытания

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Рисунок Б.1 - Вид деформированного стержня до испытания



Рисунок Б.2 - Вид деформированного стержня после испытания

ПРИЛОЖЕНИЕ В



Рисунок В.1 - Вид усиливаемых стержней полосой до испытаний



Рисунок В.2 - Вид усиливаемых стержней полосой после испытаний



Рисунок В.3 - Вид усиливаемых стержней уголком до испытаний



Рисунок В.4 - Вид усиливаемых стержней уголком до испытаний



Рисунок В.5 - Вид усиливаемых стержней полосой до испытаний

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Рисунок Г.1 - Усиление деформированных стержней уголком под нагрузкой



Рисунок Г.2 - Вид стержней усиливаемых уголком после испытаний