

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Исследование влияния начальной нагрузки на напряжённое
состояние стальной балки, усиливаемой увеличением сечения с
применением сварки»

Студент

А.В. Наклоннов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент И.К. Родионов

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

Тольятти 2020

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	6
1.1 Повреждения стальных строительных конструкций	6
1.2 Особенности усиления стальных конструкций	11
1.3 Конструктивные решения изгибаемых элементов	13
1.4 Усиление металлических балок путём увеличения сечения	21
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ.....	36
2.1 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра.....	36
2.2 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного полосой, прикрепленной к нижней полке на сварке	44
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	50
3.1 Методика испытания	51
3.2 Результаты испытания эталонной балки	61
3.3 Результаты испытания балки, усиленной без нагрузки	62
3.4 Результаты испытания балки, усиленной под нагрузкой	63
3.5 Анализ полученных результатов.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	69

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Актуальность темы исследования заключается в том что, в настоящее время развитие строительства неразрывно связано с реконструкцией, расширением и техническим перевооружением действующих зданий и сооружений. В процессе эксплуатации зданий, сооружений нередко появляется необходимость в усилении металлических ригелей: прокатных и составных балок рабочих площадок, подвалов и т.п.

Особенности эксплуатации таких балок: они находятся под нагрузкой и нередко поражены сильной коррозией.

Для дальнейшего безопасного использования, как правило, требуется их усиление.

Усиление балок проводится различными способами: изменением расчётной схемы, введением напрягаемых элементов, увеличением сечения усиливаемых конструкций.

Вопросам усиления стальных балок методом увеличения сечения уделялось значительное внимание: исследовались эффективность схем усиления, технологические аспекты присоединения элементов усиления.

Относительно неизвестны вопросы влияния начальных нагрузок и работа усиливаемых балок непосредственно в момент усиления.

Цель исследований – получение информации о влиянии начальных нагрузок на напряжённое состояние и несущую способность усиленных балок.

Задачи:

1. Теоретическое обоснование работы балок.
2. Экспериментальное исследование работы балок без усиления и усиливаемых под нагрузкой и без неё.
3. Анализ полученных результатов.

Предметом исследования является анализ напряжённого состояния усиливаемых балок.

Объект исследования магистерской диссертации – стальная балка двутаврового сечения.

Методы исследования. В ходе проведения теоретических исследований использовались классические методы строительной механики и теории сооружений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Получение информации о работе балок, усиливаемых без нагрузки.
2. Получение информации о работе балок, усиливаемых под нагрузкой.

Практическая значимость состоит в получении экспериментальных данных о влиянии начальных нагрузок на напряжённое состояние и несущую способность стальных усиливаемых балок.

Степень разработанности темы. Темой усиления металлических элементов и конструкций с целью повышения несущей способности и долговечности занимался ряд ученых. Среди них Ведеников В.С., Беленя Е.И., Игнатъева В.С., Муханов К.К., Бельский М.Р., Валь В.Н., Кикин А.И., Уваров Б.Ю., Лебедев А.Н., Андрианов К.А. и другие. В работе вышеперечисленных ученых больше затронуты конструктивные решения усиления. Значительно меньше отражено влияние на выбор технологии усиления существующих дефектов и повреждений конструкций. Проведённый поиск в технической литературе не выявил подобные работы по усилению под нагрузкой. Имеются лишь отдельные рекомендации, носящие фрагментарный характер.

Постоянное развитие города является основополагающим фактором в возникновении задач относительно различных существующих зданий и сооружений по их эксплуатационному состоянию. Предпосылками активной реконструкции является отказ городов разрастаться территориально.

Реконструкция – это изменение объемно-планировочной структуры здания, а также его конструктивно-технических решений с целью устранения физического и морального износа.

Основная доля реконструкции городов связана с развитием промышленного комплекса страны, где диктующим условием является техническое перевооружение и увеличение готовой продукции. Учитывая индивидуальность подхода к решениям задач связанных с реконструкцией, возможны изменения нагрузок на существующие конструкции, возможна смена существующих конструктивных схем. Перед увеличением нагрузок или изменением конструктивных схем необходима оценка технического состояния конструкций, для возможности подбора усиления элементов конструкций. Дополнительными причинами реконструкции могут быть ошибки при проектировании, преждевременная коррозия, механический износ, накопление дефектов и повреждений во время установки или эксплуатации. На основе вышеуказанных предпосылок формируются задачи связанные с усилением строительных конструкций. Разработка методик усиления, позволит получить рациональные экономико-конструктивные решения усиления стальных конструкций как новых, так и усиливаемых в реконструируемых зданиях и сооружениях.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Повреждения стальных строительных конструкций

Эксплуатация стальных конструкций в течение длительного времени приводит к физическому и моральному износу, возникает необходимость приспособливать существующие конструкции к новым условиям работы, вызванным реконструкцией, увеличением нагрузок, надстройкой. На работоспособность стальных конструкций и сроки их службы оказывают влияние дефекты, отклонение качества, формы и фактических размеров элементов, конструкций и узлов соединений от требований нормативных документов или проекта, также повреждения, возникающие в процессе эксплуатации, которые могут развиваться и в дальнейшем приводить к отказам в работе конструкций.

Повреждения стальных конструкций, получаемые ими в процессе эксплуатации, могут быть:

- от силовых воздействий: потеря устойчивости, трещины, разрывы. «Возникают в результате ошибок, допущенных при проектировании, уменьшении сечений элементов при изготовлении, недоброкачественного монтажа конструкций, увеличения нагрузок от технологического оборудования против проектных, перегрузка покрытий от снега и различных пылевидных выносов из источников их образования. Рассматриваемые повреждения чаще всего появляются в результате статической перегрузки отдельных конструкций, а также от динамических и вибрационных воздействий, возникающих от оборудования, установленного с нарушением технологических норм проектирования. Перегрузка конструктивных элементов каркаса может возникнуть в результате ослабления отдельных элементов. Это может произойти, если в элементах несущих конструкций прорезаются отверстия, срезаются отдельные элементы решетчатых конструкций.

- от механических воздействий: искривления, погибы, вмятины, истирание. Возникают в результате неправильной транспортировки и монтажа конструкций, неправильной транспортировки различных грузов как мостовыми кранам, так и внутривысотным железнодорожным и автомобильным транспортом, подвески к конструкциям тяжелых деталей при ремонте оборудования, нарушений правил технической эксплуатации здания»[26];
- от физических воздействий: хрупкие трещины при больших отрицательных температурах, разрушение при высоких температурах, коробление. Возникают в результате близкого расположения элементов конструкций к источникам тепловыделения, при воздействии отрицательных температур на углеродистые стали с повышенным содержанием фосфора и серы;
- от химических воздействий: коррозия металла, возникающая от влажности среды или от агрессивных жидкостей и газов. «Коррозия может быть местная, когда под воздействием местных агрессивных факторов поражаются отдельные узлы или часть конструкции на участках сравнительно небольшой длины, и равномерная, когда конструкции одинаково разрушаются по всей поверхности на значительной длине здания. Степень агрессивного воздействия газовых сред определяется их видом, концентрацией, температурой и относительной влажностью воздуха, а также скоростью обмена агрессивной среды. Скорость коррозии в воздушной среде с небольшой относительной влажностью сравнительно невелика и находится в пределах 0,05—0,07 мм в год. Такая коррозия не опасна, так как толщины элементов стальных конструкций к концу срока их службы уменьшаются незначительно. Скорость коррозии в воздушной среде в неблагоприятных условиях протекает быстро и достигает до 0,1 мм и более в год. Такая коррозия опасна для конструкций, так как она значительно уменьшает их толщины и площади сечений, в результате чего они быстро выходят из строя. Степень агрессивного воздействия жидких сред зависит от их вида, концентрации и температуры, а для растворов кислот, щелочей и солей от

водородного показателя (рН). Степень агрессивности твердых сред зависит от их вида, интенсивности и гигроскопичности агентов, а также от влажности воздуха» [26].

Оценка степени конкретных повреждений производится по допускаемым отклонениям на соответствующие дефекты, регламентированные нормами.

«Отличительные особенности металлических конструкций, учитываемые при усилении:

- высокая однородность материала, обуславливающая высокую степень соответствия работы элементов и узлов расчетными предпосылками и, соответственно малые запасы прочности, заложенные при проектировании; в результате, незначительное отклонение от расчетных положений, нарушение требуемой точности в изготовлении, монтаже, небольшие перегрузки могут привести к существенным перенапряжениям элементов металлических конструкций;
- высокая удельная прочность (отношение прочности к массе материала) обуславливает тонкостенность и гибкость несущих элементов, следовательно, подверженность под влиянием различных случайных воздействий при изготовлении, перевозке, монтаже, эксплуатации различного рода деформаций, что особо опасно для сжатых элементов;
- склонность к хрупкому и усталостному разрушению при наличии различных концентраторов напряжений, особенно, трещин в сочетании с низкими температурами и динамическими нагрузками;
- наличие сварных соединений, имеющие отличные от основного металла физико-механические свойства и характеризующихся значительным разбросом эксплуатационных свойств в зависимости от качества наложения сварных швов»[26].

Изучением и анализом причин образования повреждений инженерных сооружений занимался Ф. Д. Дмитриев [12]. Согласно его классификации можно выделить три основных группы аварий:

- аварии, вызванные природными явлениями;

- аварии, вызванные не совершенностью инженерно-технических приемов;
- аварии, вызванные социально-экономическими условиями.

Технические причины катастроф можно разделить также на три группы:

- потеря устойчивости;
- дефекты основания;
- плохое производство работ.

Также изучением аварий и обрушений занимался А.И. Мизюмский [22]. Он классифицирует причины обрушения только металлических конструкций. А.И. Мизюмский разделил аварии и крушения на следующие группы:

- вызванные дефектами, которые связаны с ошибками проектирования;
- вызванные дефектами, которые возникли в процессе производства работ;
- вызванные дефектами, которые связаны с эксплуатацией;
- вызванные недостаточно изученными условиями работ и свойствами применяемых материалов.

«Надежность здания зависит от многих факторов таких как, марки материала, сечения, формы элементов, качества изготовления и монтажа, условия эксплуатации, своевременного ремонта.

Основными способами усиления стальных конструкций являются:

- изменение конструктивной схемы всего каркаса или отдельных элементов;
- регулирование напряжений;
- увеличение площади поперечного сечения отдельных элементов конструкции;
- усиление соединений элементов;
- подведение конструкций разгрузки.

На практике зачастую усиление строительных конструкций производится не одним из перечисленных способом, а их сочетанием. Выбор наиболее эффективного решения целесообразно производить через сравнение проектных вариантов с учетом условий проведения работ.

Необходимость усиления обуславливается факторами, препятствующими продолжению нормальной эксплуатации конструкций:

- наличием недопустимых дефектов и повреждений на стадии проектирования, изготовления, транспортировки и монтажа, в процессе эксплуатации, которое не позволяет обеспечить требования прочности, устойчивости, хладостойкости или выносливости;
- эксплуатационным износом, включая коррозионный износ;
- изменением условий эксплуатации.

В последнее время по причине изменения экономического строя и длительного падения производства технический надзор за состоянием конструкций не проводился на многих предприятиях и сооружениях»[22]. Аварийность конструкций различна. В таблице 1 приведены статистические данные о частоте аварий.

Таблица 1 – Статистические данные о частоте аварий

Вид здания или сооружения	Процент от общего числа	Частота по стране в год
Одноэтажные здания со стальными конструкциями	32	7×10^{-4}
Одноэтажные здания с железобетонными конструкциями	10	8×10^{-5}
Стальные резервуары	7	-
Конвейерные галереи	4	-
Стальные эстакады под трубопроводы	2	-

Основными производственными причинами, вызвавшими аварию, были недостатки:

- строительства – 59%;
- проекта – 25%;
- эксплуатации – 16%.

Известно, что 55% всех аварий происходит в срок до одного года эксплуатации или во время строительства по причине отступлений от норм и проекта или плохого качества изготовления и монтажа.

1.2 Особенности усиления стальных конструкций

«Производство работ по усилению строительных конструкций требует затрат и, как правило, неизбежны некоторые ограничения технологического процесса. Поэтому усиление или восстановление проектной несущей способности являются крайними средствами, когда этих целей нельзя достичь ни за счет выявленных резервов несущей способности, ни путем уменьшения постоянных или временных нагрузок. Выбор рационального варианта производится на основании нескольких конкурентоспособных вариантов с учетом технологичности.

Усиление может быть:

- аварийным, производится в экстремальных ситуациях для срочного восстановления несущей способности, при использовании наиболее простых методов, рассчитанных на короткий срок эксплуатации до капитального восстановления;
- временным, которое осуществляется, если необходимо обеспечить в плановом порядке нормальную эксплуатацию до капитального усиления;
- капитальным, применяемым для решения задач при реконструкции зданий и сооружений;
- перспективным, когда на конструкцию в период эксплуатации предполагаются увеличение технологических нагрузок и другие изменения условий эксплуатации.

Способ усиления различают по степени нагруженности на момент усиления:

- под нагрузкой, который является наиболее сложным и ответственным видом усиления, требует детального обследования сохраняемой конструкции, надежной оценки ее напряженного состояния и специальных приемов

усиления, позволяющих включить элементы усиления в работу существующей конструкции;

- с частичной разгрузкой – это наиболее распространенный способ, предполагает отсутствие во время усиления временной нагрузки, например снеговой, крановой, технологической и т.п.;
- с полной разгрузкой – это способ с полным снятием временной нагрузки, применяется при аварийно-восстановительных работах либо для конструкций, основной которых является полезная (временная) нагрузка»[20].

Классификация способов усиления показана в таблице 2.

Таблица 2 – Классификация способов усиления

Под нагрузкой; С частичной нагрузкой; С полной разгрузкой	Изменение условий эксплуатации и косвенное усиление	Использование резервов несущей способности
		Ограничения работы технологического оборудования, замена его на новое с меньшей массой
		Замена существующих ограждающих конструкций на другие с меньшей массой
		подведение дополнительных промежуточных несущих конструкций
	Изменение схемы конструкции	подведение дополнительных связей, ребер, диафрагм, распределительных элементов
		Подведение дополнительных опор или подвесок
		Замоноличивание опор
		Введение новых стержневых элементов для изменения статической схемы
		Введение шарниров
		Введение затяжек в распорные системы
Искусственное регулирование напряжений	Предварительное напряжение	

Продолжение таблицы 2

	Увеличение площади сечения	Постановка доп. элементов усиления схемы
	Усиление соединений	Увеличение катета и длины сварных швов
		Постановка новых болтов, замена заклепок болтами в соединениях
	Повышение хладостойкости	Деконцентрация
Повышение ресурса по выносливости	Постановка ламелей	

1.3 Конструктивные решения изгибаемых элементов

При строительстве промышленных и жилых сооружений немаловажную роль играет такая конструкция, как балка. Балка – линейный элемент несущих конструкций, опирающийся на оба конца (в отличие от консоли) и работающий преимущественно на изгиб.

По способу крепления, строительная балка выступает в качестве горизонтального или наклонного бруса.

Основное сечение балок – двутавр. Двутавры могут быть прокатные и составные

Прокатные двутавры изготавливаются на специальных прокатных станах.

Изготовление двутавровой балки осуществляется в несколько шагов. Предварительно стальной лист разрезают на полосы необходимой длины и ширины. Далее, на фрезерном станке обрабатывают кромки для лучшей проварки шва. Заготовку зажимают и позиционируют на специальном гидравлическом стане. Следующим этапом двутавр сваривают под флюсом двумя комплектами сварочных головок на сварочном станке. С помощью автоматов привариваются поясные швы, ребра жесткости привариваются вручную, иногда - полуавтоматом. В случае, когда поясные швы сваривают

вручную, процесс сборки претерпевает изменения. К поясу нижней части балки прикрепляют вертикальную стенку, а уже потом ребра жесткости. Их зажимают и монтируют пояс в верхней части. Вся конструкция фиксируется хомутами и приваривается.

Для последующего лучшего нанесения лакокрасочного покрытия, готовое изделие обрабатывается дробеструйной установкой, которая удаляет грязь, ржавчину, масляный налет.

Каждая балка состоит из стенок и полок, которые соединяются специальными стыковыми швами. В зависимости от разновидности их конструкция может меняться. Производством занимаются на оборудованных предприятиях, где имеются все необходимые станки и приспособления. Процесс изготовления выполняется в несколько технологических этапов согласно ГОСТу.

Для каждого вида имеется свой ГОСТ, который регламентирует все основные показатели и характеристики балок. Параметры, которые строго контролируются и проверяются у готовой продукции:

- вес готового изделия;
- площадь поперечного сечения;
- высота и ширина готовой продукции;
- радиус закруглений после сварки, которые располагаются внутри;
- угол наклона граней, которые располагаются на внутренней поверхности.

В строительстве и реконструкции зданий и сооружений выделяют три основные разновидности стальных балок:

- тавровые – это металлопрокат с основным сечением в виде буквы «Т»;
- двутавровые – так как у элемента имеется дополнительная полка с противоположной стороны, оно становится более жестким, и соответственно более прочным;

- швеллер – это металлопрокат с основным сечением в виде буквы «П». данная конструкция также универсальна и имеет множество областей применения в промышленности.

При возведении, перевооружении или реконструкции жилых и нежилых помещений основным типом сечения металлических балок является двутавровое симметричное. «Двутавровое сечение выгоднее так как в этом сечении распределение материала наилучшим образом соответствует распределению нормальных напряжений от изгиба балки. Поэтому металлические балки конструируют главным образом двутаврового сечения, чему способствует хорошая работа металла на касательные напряжения, позволяющая делать стенку балки достаточно тонкой. Учитывая зависимости от нагрузки и пролета применяют балки прокатные и составные. Составные могут быть сварные и клепаные»[19].

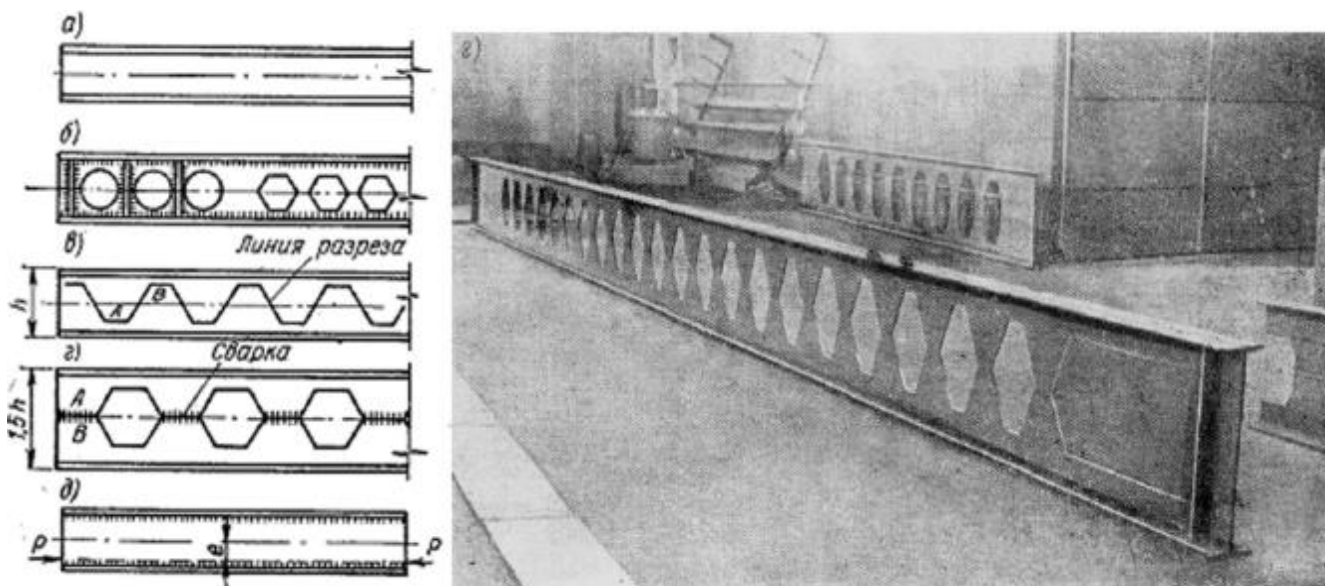
Классификация балок по типу стенки показана на рис. 1:

- сплошная;
- перфорированная отверстиями;
- перфорированная разрезкой и последующей сваркой стенки прокатного двутавра;
- предварительно напряженная.

Перфорированные балки плохо воспринимают поперечную силу. Их применяют при больших пролётах и отсутствии сосредоточенных нагрузок. Периодическое изменение сечения способствует концентрации напряжений.

По сравнению с прокатными двутаврами снижается расход материала на 25-30%, а по сравнению со сварными снижается трудоёмкость на 25-35 %. В штучном исполнении они неэффективны, так как трудоёмки и энергетически затратные.

Преимущества проявляются лишь в условиях высокомеханизированного поточного производства.



а - сплошная; б - перфорированная отверстиями;
 в, г - перфорированная разрезкой и последующей сваркой стенки прокатного двутавра; д - предварительно напряженная

Рисунок 1 - Классификация балок по типу стенки

Разделение на типы балок двутаврового сечения происходит, учитывая условия применения и соотношения размеров. Выделено три типа:

- нормальные двутавры – Б;
- широкополочные двутавры – Ш;
- колонные двутавры – К.

Справочные величины, распространяющиеся на стальные горячекатаные двутавры с параллельными гранями полок высотой 100 – 1000мм и шириной 55 – 400мм, а именно размеры, площади поперечного сечения, линейная плотность приведены в п. 4 таблицы 1 ГОСТ [6].

Контроль качества предельных отклонений по размерам и геометрической форме двутавров ведется согласно п. 5 таблицы 2 ГОСТ [6].

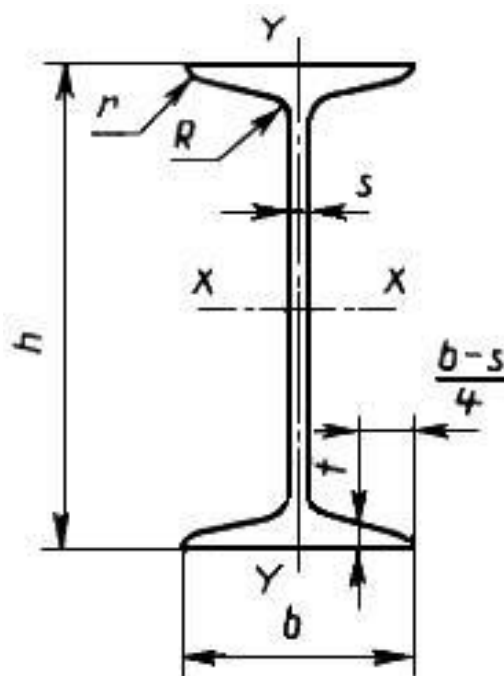
Проведение контроля качества по предельным отклонениям по длине профиля мерной и кратно мерной длины должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 3.

Важным пунктом является расстояние на котором проводится проверка, которое составляет не менее 500 мм от торца профиля. Измерение высоты профиля проводится по оси $Y - Y$.

Таблица 3 – предельные отклонения по длине профилей согласно п.7 ГОСТ[6].

Длина профиля, мм	Интервал значений параметров, мм	Предельное отклонение, мм
До 12000 включ.	$h < 790$	+60
	$h \geq 790$	+80
Свыше 12000		+100

Поперечное двутавровое сечение должно соответствовать [6, п.3]. Сечение обычного двутавра показано на рис. 2.



h – высота двутавра; b – ширина полки; s – толщина стенки;
 t – толщина полки; r – радиус сопряжения.

Рисунок 2 – Поперечное сечение двутаврового типа

Металлические балки классифицируют по рабочей схеме:

- однопролетные (разрезные);
- многопролетные (неразрезные);
- консольные (с одной опорой в виде защемления).

«Чаще применяются балки однопролетные разрезные: они наиболее удобны в изготовлении и монтаже по сравнению с многопролётными. Однако по затрате металла они менее выгодны, чем неразрезные и консольные.

Неразрезные балки благодаря наличию опорного момента, уменьшающего основные моменты в пролетах, более экономичны по затрате материала. Их большая чувствительность к изменениям температуры и осадкам опор, а также необходимость делать крайние пролеты меньше средних для сохранения постоянства сечения делают конструкции таких балок индивидуальными, немассовыми, а применение их сравнительно редким»[19].

Основной недостаток консольных балок - большие прогибы: наибольший прогиб консоли оказывается в 9-16 раз больше, чем в аналогичной разрезной балке.

Экономия материала достигается за счёт того, что момент, действующий в разрезной балке, в аналогичной неразрезной балке распределяется между сечениями в пролете и на опорах.

«Расчет изгибаемых элементов в общем случае ведется как по первой группе предельных состояний (вязкое или усталостное разрушение, потеря устойчивости, текучесть материала), так и по второй (достижение предельных перемещений). Для балки это, как правило, прогиб в середине пролета или на конце консоли, отнесенные соответственно к длине пролета балки или консоли.

В упругой области работы материала предельное состояние изгибаемого элемента определяется достижением максимальными нормальными или

касательными напряжениями предельных значений хотя бы в одной точке (или волокне) сечения. За предельные значения при этом принимают для нормальных напряжений основное расчетное сопротивление растяжению, сжатию или изгибу R_y , а для касательных напряжений – расчетное сопротивление срезу R_s , которые используют в расчете с поправкой на условия работы»[23].

Расчетные усилия в сечении балки – это изгибающий момент M_{\max} и поперечная сила Q_{\max} .

Балки подразделяются на три класса в зависимости от напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетного сечения:

1-й класс — работающие в упругой стадии (напряжения по всей площади сечения не превышают расчетного сопротивления стали);

2-й класс — работающие в упругопластической стадии (в одной части сечения напряжения меньше R , а в другой — равны R_y);

3-й класс — работающие в пластической стадии (по всей площади сечения напряжения равны R — образуется так называемый пластический шарнир).

Класс напряженного состояния сечения при проектировании следует назначать в зависимости от допустимых пластических деформаций, целесообразных размеров сечения элемента в целом, толщины стенок и поясных листов. Следует учитывать назначение конструкции, характер нагрузок и воздействий, опасность хрупкого разрушения, агрессивность среды, конструктивные ограничения, степень огнестойкости и другие факторы.

В изгибаемых элементах в упругой стадии полностью нагруженными в предельном состоянии оказываются лишь крайние волокна, а средние недогружены, что показано на рис. 3. «Появление текучести материала в фибровых зонах элемента не приводит к исчерпанию несущей способности элемента, так как рост напряжений ограничен пределом текучести, а в глубине сечения, где только упругие деформации, напряжения остаются пропорциональны деформациям и меньше предела текучести»[19]. Часть

сечения, где деформации и соответственно напряжения не превышают предельных значений, образует упругое ядро, в котором отсутствует текучесть, и, следовательно, прогиб балки имеет конечное значение.

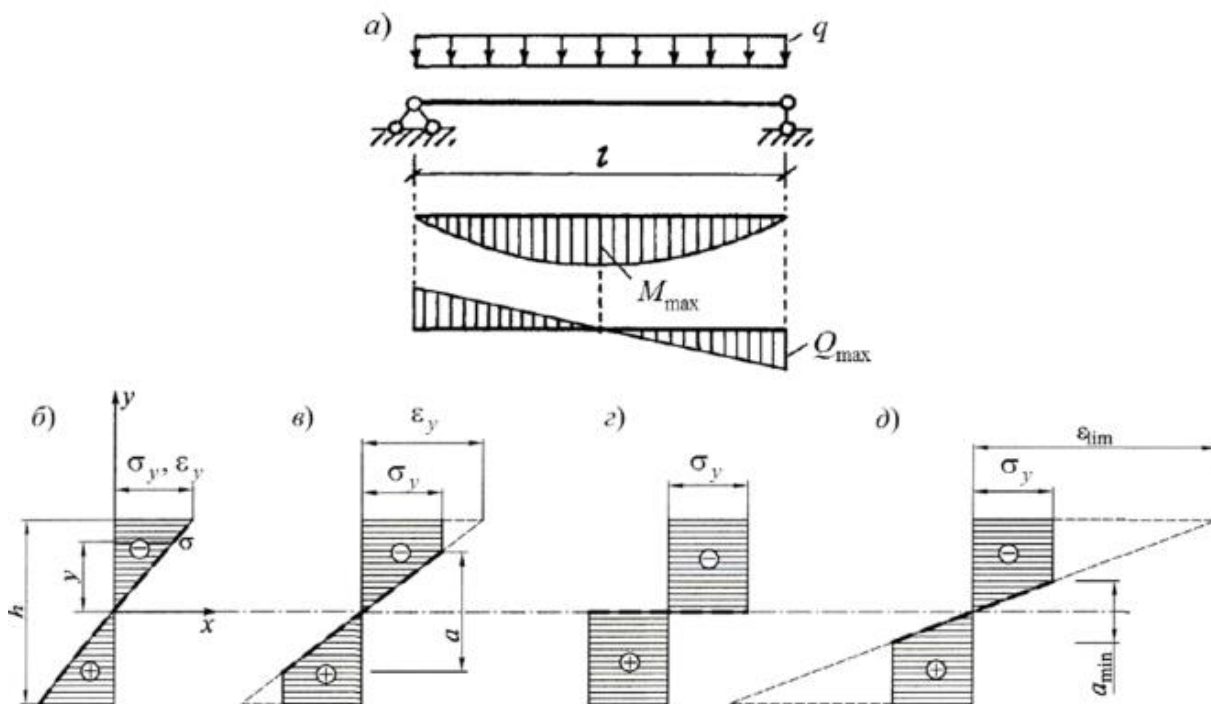


Рисунок 3 – Три класса работы изгибаемого элемента

По мере возрастания момента деформации увеличиваются, упругое ядро, где напряжения меньше предела текучести уменьшается. Полное исчерпание несущей способности элемента наступит, когда происходит пластификация всего сечения, при котором по всей высоте сечения напряжения равны пределу текучести. В рассматриваемом нами двутавровым сечении образуется условный пластический шарнир. В практике разрушение металлических балок происходит всегда в упругопластической стадии.

Для разрезных балок из стали с пределом текучести до 530 МПа, несущих статическую нагрузку, допускается работа с учетом ограниченного развития пластических деформаций, что также позволяет сократить расход стали.

1.4 Усиление металлических балок путём увеличения сечения

При недостаточной несущей способности отдельных элементов, конструкций или зданий и сооружений производится их усиление, при этом, необходимо предусмотреть минимальные потери из-за остановок технологического цикла. При усилении металлических конструкций необходимо выполнить разгрузку не менее чем на 60% или установить временные дополнительные опоры.

Согласно п.3.3 [25] выделяют следующие способы усиления металлических конструкций:

- увеличение сечений элементов;
- изменение конструктивной схемы;
- установка дополнительных связей, ребер, диафрагм, распорок;
- подведение новых дополнительных конструкций или элементов;
- усиление соединений элементов;
- предварительное напряжение конструкций.

«Усиление проводится посредством установки дополнительных деталей, в результате чего развиваются расчетные сечения конструкций или их элементов, а также ликвидируются дефекты и повреждения или их последствия.

При усилении конструкций способом увеличения сечений рекомендуется использовать металл в виде листового, сортового и фасонного проката.

Рассматриваемый способ усиления применяется при текущем и капитальном ремонте несущих конструкций производственных зданий и сооружений, а также при необходимости увеличения несущей способности конструкций в связи с увеличением нагрузок на них вследствие реконструкции.

Выбор марок стали для элементов усиления необходимо производить в зависимости от значимости усиливаемых конструкций или их элементов, условий эксплуатации, толщины применяемого проката, руководствуясь

указаниями по применению стали для стальных конструкций зданий и сооружений, указанных в СП 16.13330.2017. Стальные конструкции»[25].

Предельный уровень начальных напряжений при усилении с помощью сварки в зависимости от класса конструкций представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Предельный уровень начальных напряжений при усилении с помощью сварки в зависимости от класса конструкций

Номер группы, к которой относится конструкция	Предельный уровень начальных напряжений
1 группа	$\sigma_{max} \leq 0.2R_y$
2 группа	$\sigma_{max} \leq 0.4R_y$
3 группа	$\sigma_{max} \leq 0.6R_y$
4 группа	$\sigma_{max} \leq 0.8R_y$.

При конструировании и расчете усиления элементов необходимо соблюдать следующие требования:

- необходимо, чтобы элементы усиления сечения присоединялись таким образом, чтобы центры тяжести совпадали (расцентровка не более 5%). Если не соблюдается, то необходимо учитывать дополнительные изгибающие моменты от расцентровки;
- необходимо обеспечить надежное включение в совместную работу с основным сечением;
- при усилении конструкций необходимо учитывать последовательность включения элементов;
- если элементы усиления применены на сварке, необходимо применять фланговые швы; исключать швы поперек элементов;
- при расчете под нагрузкой на устойчивость необходимо учитывать начальные и допустимые деформации элементов, возникающие на стадии усиления;

- с целью обеспечения несущей способности существующую конструкцию в период выполнения усиления и полного включения элементов в совместную работу с основным сечением ограничивается величина наибольших напряжений в расчетном сечении.

Если указанные условия не выполняются, то необходимо дополнительная разгрузка или подведение временных опор.

Некоторые варианты конструктивных схем усиления стальных балок приведены на рис. 4.

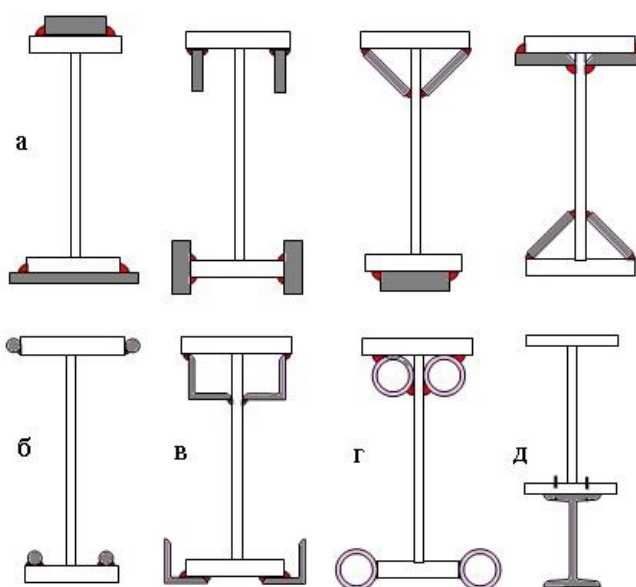


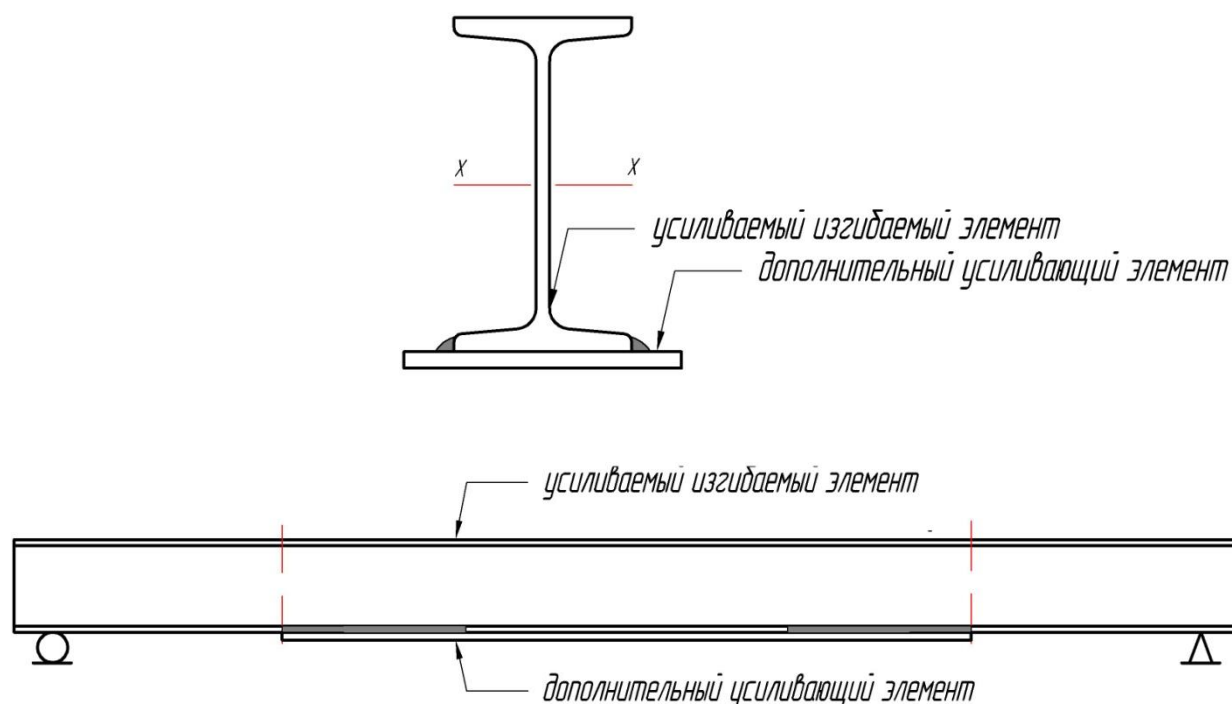
Рисунок 4 – Усиление стальных балок увеличением поперечного сечения с применением: а – пластин; б – стержней; в – уголков

При выполнении усиления центрально-растянутых и сжатых металлических конструкций следует стремиться к сохранению центровки усиливаемых элементов и узлов соединений, т.е. дополнительные элементы необходимо располагать так, чтобы положение центра тяжести элемента после усиления не изменялось или проводить проверку прочности усиленного элемента с учетом появившегося эксцентриситета.

«При усилении изгибаемых элементов наиболее рациональным по расходу стали являются схемы, представленные на рисунке 5,

предусматривающие симметричное или близкое к симметричному усилению с расположением усиливающих элементов по возможности дальше от центра тяжести сечений усиливаемого элемента.

При усилении балок, как правило, нет необходимости располагать элементы по всей длине усиливаемого элемента, а можно ограничиться только участком с максимальным изгибающим моментом»[25].



Масштаб: торец балки - 1:2, вид сбоку - 1:10

Рисунок 5 – Усиление изгибаемого элемента путем увеличения сечения:

Наиболее простой способ усиления – полоса, прикрепляемая к нижнему поясу балки. При большой ширине полосы можно избежать потолочных швов, но при слишком большой ширине нижней накладке возникает значительная концентрация напряжений по кромкам балки.

Усиление изгибаемых металлических конструкций имеет следующие особенности:

- увеличение поперечного сечения изгибаемого элемента можно ограничивать лишь зоной действия максимальных изгибающих моментов, где усиление требуется по расчету;

- при конструировании усиления следует стремиться к наиболее эффективному размещению дополнительных деталей (на возможно большем расстоянии от нейтральной оси не усиленного сечения);
- влияние сварочных деформаций при усилении, увеличивающих прогиб.

Контроль качества проводится на каждом этапе усиления металлических конструкций. Поверхность элементов усиления и усиливаемых конструкций, подготовленных под сборку должна отвечать третьему классу шероховатости по ГОСТ [9]. Поверхность необходимо тщательно просушить и прочистить, кромки, полученные в результате сварки, обработать до металлического блеска.

Элементы конструкций, испытывающие растяжение, сжатие или изгиб, усиливаемые путем увеличения сечения соединяются между собой сваркой или болтовыми соединениями новых дополнительных деталей. Несущая способность элемента при этом возрастает с увеличением его сечения или жесткости.

При конструировании усиления сварные швы, болтовые соединения необходимо располагать в удобных для исполнения и контроля качества местах.

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

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

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

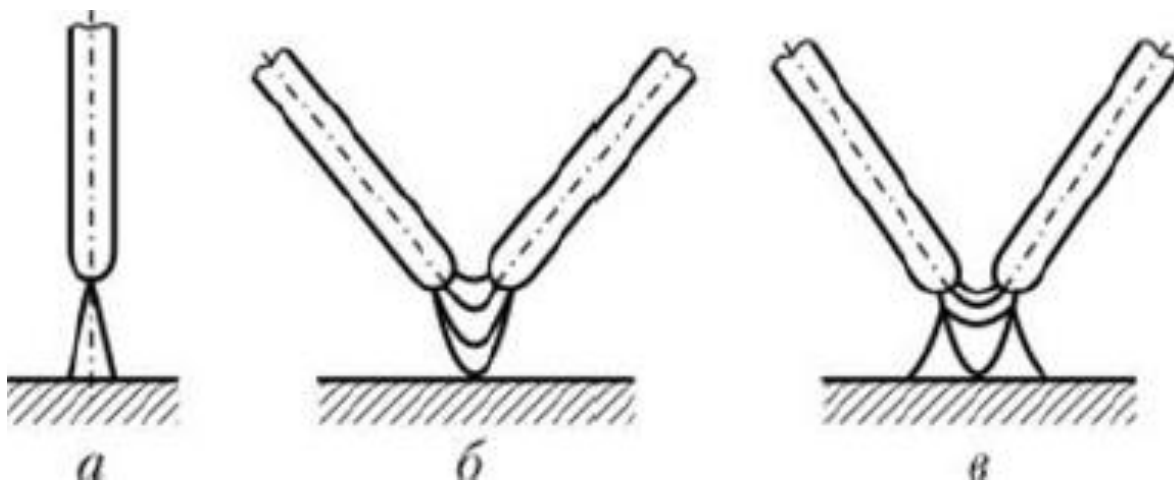
Различают следующие длины сварочных дуг:

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

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

Возможны следующие виды сварочных дуг:

- прямая дуга, когда контакт происходит между электродом и свариваемым элементом;
- косвенная дуга, когда контакт происходит между двумя электродами, а сам свариваемый элемент не включен в сварочную электрическую цепь;
- трехфазная дуга, когда контакт происходит между электродами, а также между каждым электродом и свариваемой поверхностью.



а – короткие дуги; б – косвенная дуга; в – трехфазная дуга

Рисунок 6 – Виды сварочных дуг

Наиболее часто применяемой является прямая дуга.

В процессе сварки возможны для применения два вида тока: постоянный, переменный. Частота для использования переменного тока – 50 Гц.

Возникающие полярности при работе с постоянным током делятся на два типа: прямая и обратная полярности. В зависимости от метода прикрепления источника сварки к элементу. При возникновении прямой полярности на электроде образовывается знак минус (отрицательная полярность), а на металле образовывается знак плюс (положительная полярность). При возникновении обратной полярности на электроде образовывается знак плюс (положительная полярность), а на металле образовывается знак минус (отрицательная полярность).

Электроды для сварных работ делятся на два типа:

1. Плавящийся электрод.

При работе с таким электродом возникает высокая сила тока в цепи. При ручном способе сварки сила тока варьируются от 100А до 400А, при полуавтоматическом способе от 350А до 600А, при автоматическом способе от 600А до 1000А.

2. Неплавящийся электрод.

Данный вид электрода может быть изготовлен из вольфрама, также возможно применение угольного электрода.

При появлении сварочной дуги напряжение составляет от 40В до 70В, при том когда само сварочное напряжение составляет от 30В до 60В.

Безопасное применение сварочных работ обусловлено только при стабильном режиме напряжения. В соответствии с техникой безопасности предельное отклонение напряжения при сварочных работах составляет не более 5%.

Доля тепловой энергии возникающей при образовании сварочной дуги идет на расплавление металла, тогда когда остальная часть переходит в атмосферу, на расплавление флюсов или оболочки электрода.

Тепловая мощность дуги называется эффективной если тепловая энергия идет на нагрев и расплав металла элемента, это и считается временной единицей сварочной дуги.

Глубина расплавления основной части металла элемента, охарактеризованная проплавлением или проваром шва, изменяется с учетом эффективности тепловой мощности дуги.

Пропавления сварного шва это в свою очередь выражается как коэффициент проплавления в двух случаях: по самому шву или границе зоны сплавления.

Коэффициент проплавления различают:

1. При работе ручной сварки – незначительный показатель коэффициента;
2. При работе с полуавтоматической сваркой – показатель увеличивается;
3. При работе с автоматической сваркой – показатель коэффициента самый высокий.

Кромки металла подлежат расплаву в тот момент, когда происходит воздействие тепловой энергии электрической дуги от работы сварки или электрода, флюса или оболочки электрода. При дальнейшей работы сварки образовывается так называемая сварочная ванна из основного расплавленного металла элемента. Сварочная ванна в результате процесса сварки покрывается шлаком и газами.

Струйная сварка представляет собой процесс когда электродный металл переносится в виде капель в разделку в количестве от 25 до 50 капель в течении буквально одной секунды. При работе сварки в аргоне и углекислом газе, учитывая высокую плотность тока, электродный металл переносится в виде капель в разделку более мелким потоком, чем при обычных условиях работы.

При образовании сварного шва в момент сварки частицы металла переносятся от электрода к свариваемым изделиям. Направление электрического тока, а также положение свариваемых элементов относительно друг друга не учитываются при непосредственном образовании сварного шва.

Коэффициент расплавления также учитывает возможную различную скорость расплавления основного материала сварного шва, что аналогично влияет на эффективность сварочного процесса.

При работе со стальными электродами коэффициент расплавления бывает от 5 до 20 г/а-ч.

Коэффициент наплавки характеризуется эффективностью заполнения шва, так как при работе с электродом, он не весь переходит в металл шва, а в свою очередь уходит на разбрызгивание или окисление.

Коэффициенты наплавки от 5% до 25% меньше возможного коэффициента расплавки, так как учитываются потери электродных металлов в процессе сварочных работ.

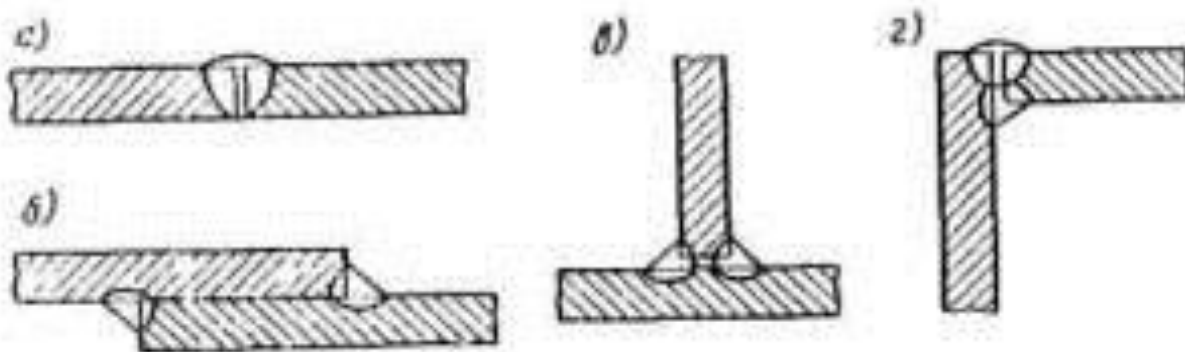
Меньшее значение имеет отношение к сварке по флюсом, большее относится к ручной дуговой сварке.

Необходимые геометрические параметры швов и механические свойства сварных швов должны обеспечиваться технологией сварки при наименьшем внутреннем напряжении и деформации свариваемого металла.

При увеличении сечения путем приварки в процессе сварки может снижаться несущая способность. Степень снижения зависит от режима сварки, толщины и ширины элемента, направления сварки. Для продольных швов снижение прочности не превышает 15%, для поперечных может достигать 40%. Поэтому наложение швов поперек элемента при его усилении под нагрузкой категорически запрещается. При сварных соединениях следует учитывать появление дополнительных и остаточных сварочных деформаций. Например, усиление ферм следует начинать с элементов и узлов нижнего пояса, а затем производить усиление верхнего пояса.

В связи с некоторой потерей прочности элементов при сварке, а также перераспределением напряжений, как по сечению элемента, так и между элементами усиление под нагрузкой производят при напряжениях, не превышающих $0.8R_y$, где R_y расчетное сопротивление для стали, из которой изготовлен элемент.

Основными типами монтажных сварных соединений являются: стыковое, нахлесточное, тавровое и угловое, показанные на рис. 7.



а – стыковое, б – нахлесточное, в – тавровое, г – угловое

Рисунок 7 – основные типы сварных соединений

Проектируя сварное соединения для создания усиленной конструкции необходимо учитывать следующие положения:

- принимать минимально необходимое количество и минимальные размеры сварных швов;
- предусматривать применение высокопроизводительных механизированных способов сварки;
- предусматривать применение эффективных сварочных материалов (электродов, электродных проволок, защитных газов, флюсов);
- предусматривать такое расположение и размеры сварных швов, при которых максимально сокращалась бы необходимость кантовки конструкций при их изготовлении, а также уменьшились бы размеры соединяемых деталей;
- обеспечивать свободный доступ к местам наложения швов и удобное пространственное положение с учетом выбранного способа и технологии сварки и принятого метода неразрушающего контроля швов;
- увеличение сечений швов не повышает работоспособность конструкций и в некоторых случаях снижает ее.

При усилении путем увеличения сечения в большинстве случаев используют нахлесточное соединение, в котором усиливаемый и усиливающий элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга, что в свою очередь упрощает сборку и сварку швов.

При проектировании и расчете сварных соединений размеры сварных углов швов и сама конструкция соединений, производится, учитывая следующие требования:

- катет углового шва $k_f \leq 1.2t$, где t – минимальная толщина из свариваемых элементов;
- катету углового шва k_f при расчете должен отвечать требованиям таблице 38 СП [2];
- расчетная длина углового шва составляет не менее $4k_f$, но не мене 40мм;
- расчетная длина флангового шва не более $85\beta_f k_f$. учитывая швы, в которых усилие действует на всем протяжении, где β_f – коэффициент принимается согласно таблице 39 СП [28].
- размер нахлестки принимается не менее $5t$, где t – толщина самого тонкого элемента в сварном соединении;
- соотношение размеров катетов угловых швов – 1:1; если толщина свариваемых элементов разная, существует допуск принимать швы с неравными катетами;
- шов необходимо выполнять так, чтобы получался плавный переход к основному металлу, для обеспечения повышения расчетного сопротивления усталости сварных соединений.

Расчет сварного соединения на срез с запроектированными угловыми швами при действии возникающего момента M в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения швов по металлу шва определяется по формуле:

$$\frac{M}{W_f R_{wf} \gamma_c} \leq 1;$$

где W_f – момент сопротивления расчетных сечений сварного соединения по металлу шва принятый по ГОСТ [6];

R_{wf} – расчетное сопротивление угловых швов срезу по металлу шва, определяется согласно СП [28]:

$$R_{wf} = \frac{0.55R_{wun}}{\gamma_{wm}};$$

где $\gamma_{wm} = 1.25$ – при $R_{wun} \leq 490$ МПа

Качество сварных швов проверяется внешним осмотром в соответствии с ГОСТ [10]; критерии приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Проверка качества сварных швов

Вид контроля	Метод контроля	Характеристики метода		
		Дефекты	Чувствительность	Особенности метода
Технический осмотр	Внешний осмотр	Поверхностные дефекты	Выявление несплошности отклонения размера и формы сварного соединения от заданных величин более 0.1мм, поверхностное окисление сварного соединения	Метод позволяет обнаружить дефекты минимального выявляемого размера при осмотре и измерении сварного соединения с использованием оптических приборов с увеличением 10х измерительных приборов

Следует применять следующие виды сварки:

- автоматическую сварку под флюсом следует применять при укрупнительной сборке конструкций для швов значительной протяженности;
- механизированная (полуавтоматическая) сварка самозащитной порошковой проволокой может быть применена при укрупнении и монтаже металлоконструкций для сварки швов в нижнем, наклонном и вертикальном положениях;
- механизированную (полуавтоматическую) сварку в углекислом газе (проволокой сплошного сечения) следует использовать для укрупнительной и монтажной сварки металлоконструкций в любом положении шва при условии защиты места сварки от ветра;

- где не может быть использована автоматическая и механизированная сварка, должна применяться ручная дуговая сварка.

Контроль качества швов сварных соединений стальных конструкций осуществляется методами вскрытия шва высверливанием для контроля угловых швов (ГОСТ [10]), керосиновую пробу (при толщине металла до 10 мм) и метод химических реакций (при толщине металла до 16 мм) для контроля стыковых швов (ГОСТ [10]). Швы не должны иметь наплывов, трещин, пережогов и перерывов, резкого перехода к основному металлу. Дефекты швов не должны выходить за пределы, указанные в п. 1.50 СНиП[29].

Швы сварных соединений и конструкции по окончании сварки должны быть очищены от шлака, брызг и натеков металла. Приваренные сборочные приспособления надлежит удалять без применения ударных воздействий и повреждения основного металла, а места их приварки зачищать до основного металла с удалением всех дефектов.

Монтажные сварные соединения при статических испытаниях должны иметь прочность не ниже прочности основного металла, регламентированной стандартом. Твердость и относительное удлинение металла всех швов, ударная вязкость металла стыковых швов и околошовной зоны (по линии сплавления) должны отвечать требованиям, прописанных в СНиП [29].

Достоинством сварных соединений являются:

- низкая масса соединения;
- невысокая трудоемкость изготовления;
- простота монтажа соединения;
- экономия стали 10-20% из-за отсутствия необходимости дополнительных накладок;
- достижение полного геометрического стыка;
- возможность автоматизации;
- невысокая стоимость используемого оборудования;

- снижение стоимости в условиях единичного и мелкосерийного производства монтажных работ.

Недостатком сварных соединений является:

- хрупкое разрушение при действии низких, отрицательных температур и динамических нагрузок, вследствие восприимчивости к концентрациям напряжений;
- вероятность возникновения различных дефектов самих швов;
- возникновение остаточных напряжений, что снижает прочность и вызывает необходимость проведения механической обработки после старения;
- местный нагрев в зоне термического влияния вблизи шва влечет к изменению механических свойств металла;
- понижение прочности швов вследствие неправильного выбора параметров технологического процесса.

Выводы по 1-й главе

В процессе эксплуатации зданий, сооружений нередко появляется необходимость в усилении металлических ригелей: прокатных и составных балок рабочих площадок, подвалов и т.п.

Особенности эксплуатации таких балок: они находятся под нагрузкой и нередко поражены сильной коррозией.

Для дальнейшего безопасного использования, как правило, требуется их усиление.

Усиление балок проводится различными способами: изменением расчётной схемы, введением напрягаемых элементов, увеличением сечения усиливаемых конструкций.

Вопросам усиления стальных балок методом увеличения сечения уделялось значительное внимание: исследовались эффективность схем усиления, технологические аспекты присоединения элементов усиления.

Относительно неизвестны вопросы влияния начальных нагрузок и работа усиливаемых балок непосредственно в момент усиления.

В этой связи тема: «Исследование влияния начальных напряжений от нагрузки на напряжённое состояние балок, усиливаемых с применением сварки» представляется актуальной.

Для разработки темы были поставлены следующие задачи:

1. Теоретическое исследование напряжённого состояния усиливаемых балок.
2. Экспериментальное исследование напряжённого состояния усиливаемых балок.
3. Апробация полученных результатов.

Проведённый поиск в технической литературе не выявил подобные работы, проведённые в этом направлении. Имеются лишь отдельные рекомендации, носящие фрагментарный характер. Отсюда очевидна новизна предлагаемого исследования.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Расчетная схема конструкции должна отражать условия её работы и фактическое состояние, установленные данными обследований. В необходимых случаях следует выполнять расчет с использованием нескольких вариантов расчетных схем и распределения жесткостей.

«Для конструкций, не имеющих дефектов и повреждений, расчет допускается ограничивать сопоставлением значений внутренних усилий (моментов, поперечных сил) от расчетных нагрузок со значениями усилий, а при изменении только нагрузок без изменения их характера и способа приложения – сопоставлением их значений»[20].

Исследования будут проводиться, учитывая возможности лаборатории архитектурно-строительного института ТГУ: наличие установки для испытания на поперечный изгиб.

2.1 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра

Установка позволяет испытывать балки пролётом 1,5 м с нагружением двумя симметричными силами, расположенными на расстоянии 0,5 м от опор, что показано на рис. 8.

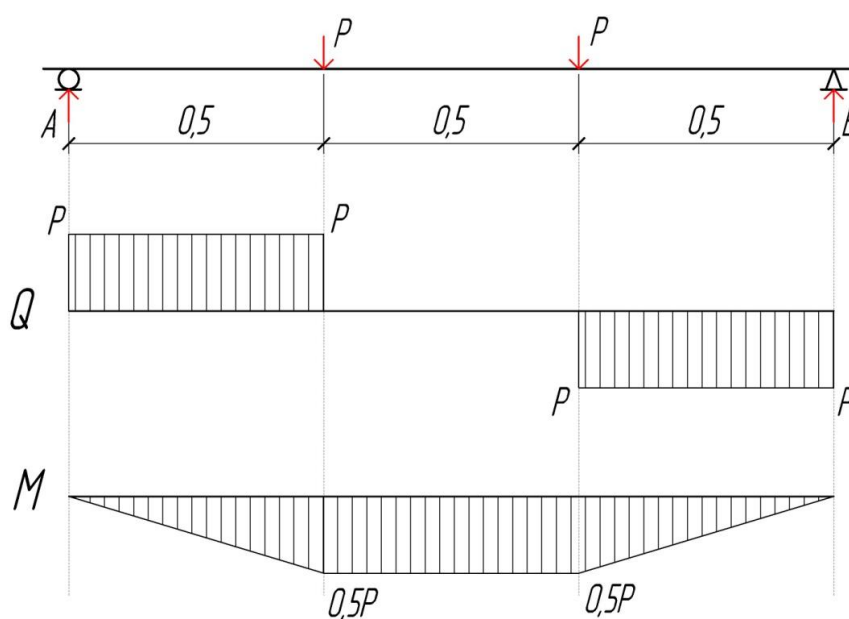


Рисунок 8 – Схема нагружения балки

Схема закрепления балки: шарнирно опертая. Вид прилагаемой нагрузки: две сосредоточенные силы одинаковой величины, симметрично расположенные относительно середины пролёта.

Прямой изгиб подразделяют на чистый и поперечный. При чистом прямом изгибе в поперечных сечениях балки возникает лишь один внутренний силовой фактор – изгибающий момент. При прямом и поперечном изгибе в сечениях балки возникают два силовых фактора (внутренних усилия): изгибающий момент M и поперечная сила Q .

Практика показывает, что изгибающий момент в большинстве случаев имеет решающее значение при подборе сечения и проверке прочности балочных конструкций. Под действием нагрузки балка прогибается так, что ее нижние волокна удлиняются, а верхние укорачиваются, т.е. изгиб сопровождается появлением нормальных напряжений. При постепенном переходе в сечении от удлиняющихся волокон к укорачивающимся (или наоборот) имеет место промежуточный слой волокон, который не меняет своей длины. Этот слой называется нейтральным, а линия его пересечения с плоскостью поперечного сечения балки – нейтральной линией или осью.

Таким образом, нейтральная линия является геометрическим местом концентрации точек, в которых нормальные напряжения равны нулю. Для выяснения характера распределения и значения напряжений, вызываемых изгибающим моментом, обратимся к случаю чистого изгиба. Чистый изгиб – деформации волокон пропорциональны их расстоянию от нейтрального слоя; нормальные напряжения изменяются по высоте сечения линейно.

Изгибающий момент « M_x » и координату « y » удобнее всего брать по абсолютному значению, а знак напряжения устанавливать исходя из характера деформирования балки (при растяжении – плюс, при сжатии – минус), т.е. по эпюре « M », ординаты которой откладывают со стороны растянутых волокон. Нетрудно догадаться, что максимальные значения напряжений возникают в точках, наиболее удаленных от нейтральной линии. При поперечном изгибе действуют не только нормальные, но и касательные

напряжения. Последние усложняют картину деформирования, приводя к искривлению поперечных сечений балки, в результате чего нарушается гипотеза плоских сечений.

Однако тщательное исследование в этой области показывают, что искажения, вносимые касательными напряжениями, незначительно влияют на нормальные напряжения. Таким образом, при определении нормальных напряжений в случае поперечного изгиба вполне применима теория чистого изгиба. Касательные напряжения в расчетах на прочность как правило не учитываются. Выбор расчетных сечений и контрольных точек. На рисунке 8 показана расчетная схема балки, эпюры изгибающих моментов и поперечных сил. «По характеру эпюр видно, что в среднем отсеке балки, между сосредоточенными силами, имеет место чистый изгиб под действием изгибающего момента M_{\max} , а в крайних отсеках – поперечный изгиб под действием изгибающего момента, изменяющегося в пределах от 0 до M_{\max} при постоянной поперечной силе, равной Q_{\max} . Конструктивный расчет по предельным состояниям производят, как правило, в таких поперечных сечениях и расчетных точках, где возникают наибольшие нормальные, касательные и главные напряжения. В исследуемой балке наибольшие нормальные напряжения будут там, где $M = M_{\max}$. Наибольшие касательные напряжения, как известно из курса сопротивления материалов, действуют на уровне нейтрального слоя в сечении, где $Q = Q_{\max}$. В исследуемой балке это имеет место в приопорных отсеках в любой точке, расположенной на оси балки. Наибольшие главные напряжения в стенках балок возникают в местах сопряжения ее с полками, т.е. в крайних нижних и верхних точках. В сочетании с главными сжимающими напряжениями, действующими на уровне нейтральной слоя, они могут стать причиной потери устойчивости тонкой стенки. Наиболее вероятным местом потери устойчивости стенки является середина приопорных отсеков»[20].

Таким образом, возможности установки ограничиваются работой балок на чистый изгиб.

Максимальную нагрузку, которую может воспринимать стальной двутавр в пределах упругой работы, можно определить по формуле 1:

$$P_{max} = \frac{W_x \sigma_T}{a} \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести стали балки;

a – расстояние от опоры до приложенных двух сосредоточенных нагрузок P_{max} ;

W_x – момент сопротивления сечения брутто относительно оси x .

Максимальный расчетный изгибающий момент для эталонного образца определяется по формуле 2 исходя из эпюры моментов указанных на рис. 7:

$$M_{max} = 0,5P_{max}a, \quad (2)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка, которую может воспринимать исследуемый двутавр.

Опорные реакции балки опертой на двух шарнирах определяются по формуле 3:

$$A = B = P_{max}. \quad (3)$$

Напряженно-деформированное упругое состояние балки

При состоянии балки напряженно-деформированного состояния 1-го класса, когда напряжения возникающие по всей площади сечения не могут превысить расчетного сопротивления $|\sigma| \leq R_y$, т.е. у рассматриваемого нами двутавровом сечении упругое состояние [28, п. 4.2.7], балка рассчитывается на изгиб и на срез согласно СП 16.13330.2017. Стальные конструкции [28, п. 8.2.1].

На изгиб при действии момента в одной из главных плоскостей:

$$\frac{M}{W_{xn,min} R_y \gamma_c} \leq 1; \quad (4)$$

где R_y – расчетное сопротивление стали на сжатие, растяжение, изгиб, определенное по пределу текучести;

γ_c – коэффициент условий работы равный в соответствии с [28, табл. 1];

M – максимальный расчетный изгибающий момент, найденный по формуле 2;

$W_{xn,min}$ – момент сопротивления сечения нетто относительно оси x .

На срез при действии в сечении поперечной силы:

$$\frac{PS}{ItR_s \gamma_c} \leq 1, \quad (5)$$

где P – поперечная сила;

S – статический момент сдвигаемой части сечения брутто относительно нейтральной оси;

I – момент инерции сечения брутто;

t – толщина стенки двутавра;

R_s – расчетное сопротивление стали сдвигу определяемое по формуле 6;

γ_c – коэффициент условий работы равный в соответствии с [28, табл. 1].

Расчетное сопротивление стали сдвигу определяется по формуле 6 в соответствии с [28, табл. 2]:

$$R_s = 0.58R_y. \quad (6)$$

Эпюры нормальных (σ) напряжений и касательных (τ) напряжений для упругого состояния сечения балки показаны на рис. 9.

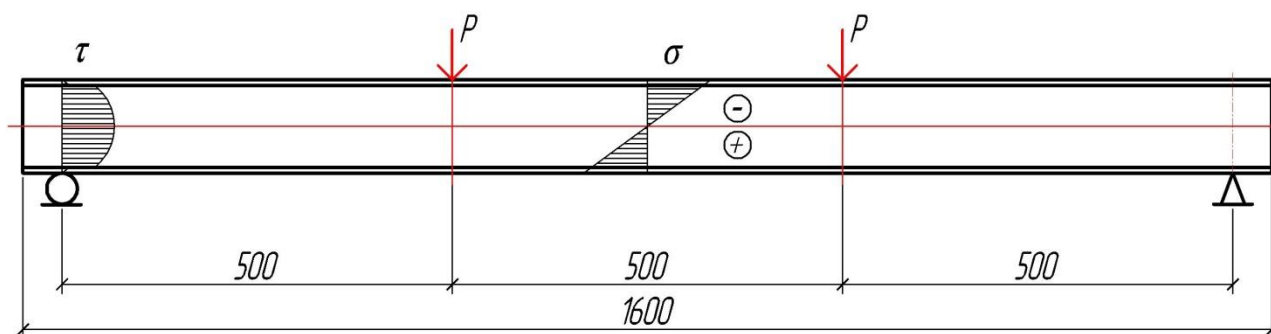


Рисунок 9 – Эпюры нормальных и касательных напряжений для упругой работы

Таким образом, учитывая формулу 1 и формулу 2 нормальные напряжения в сечениях двутавровых балок определяются соответственно по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq R_y; \quad (7)$$

где M – максимальный расчетный изгибающий момент, найденный по формуле 2;

W_x – момент сопротивления сечения брутто относительно оси x ;

R_y – расчетное сопротивление стали на сжатие, растяжение, изгиб, определенное по пределу текучести.

Также, учитывая формулы 1 и 5 касательные напряжения в сечениях двутавровых балок определяются по следующей формуле:

$$\tau = \frac{QS_x}{I_x s} \leq R_s . \quad (8)$$

где Q – перерезывающее усилие;

I_x – соответственно момент инерции и сечения относительно оси x ;

S_x – статический момент сдвигаемой части сечения относительно оси x ;

s – толщина стенки;

R_s – расчётное сопротивление стали на срез.

Работа на срез в прокатных балках при отсутствии ослаблений опорных сечений обычно обеспечена, вследствие относительно большой толщины стенок балок. Таким образом, основным является обеспечение условий работы на изгиб по нормальным напряжениям.

Напряженно-деформированное упруго-пластическое состояние балки

При дальнейшем нагружении текучесть начинает проникать внутрь сечения. Появляются верхние и нижние зоны текучести при сохранении упругого внутреннего ядра. Такое состояние характеризуется как напряженно-деформированное состояние 2-го класса и называется упруго-пластическим. В соответствии с требованиями [28, п. 4.2.7], допускается развитие некоторой доли пластических деформаций.

Эпюры нормальных (σ) напряжений и касательных (τ) напряжений для упруго-пластического состояния сечения исследуемой балки показаны на рис. 10.

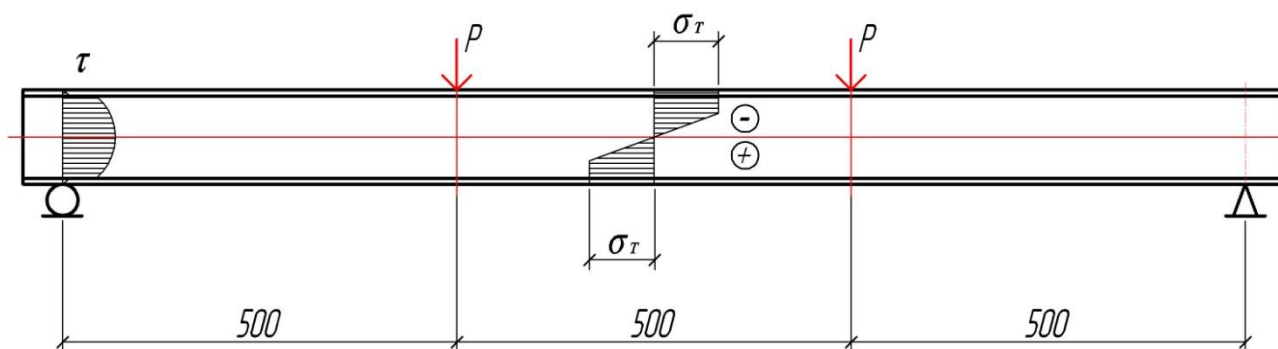


Рисунок 10 – Эпюры нормальных и касательных напряжений для упругопластической работы

Нормальные напряжения с учетом возможности развития пластических деформаций определяются по формуле в соответствии [25, п. 8.2.3]:

$$\sigma = \frac{M}{c_x \beta W_x} \leq R_y \gamma_c \quad (9)$$

где M – максимальный расчетный изгибающий момент найденный по формуле2;

W_x – момент сопротивления сечения брутто относительно оси x ;

β – коэффициент, принимаемый в зависимости от величины касательных напряжений;

c_x – коэффициент учёта развития пластических деформаций, определяемый по [25, табл. E.1] в зависимости от схемы сечения; для двутавровых балок можно для упрощения с достаточной точностью принять $c_x=1,1$;

γ_c – коэффициент условий работы равный в соответствии с [28, табл. 1].

Напряженно-деформированное пластическое состояние балки

Эпюры нормальных (σ) напряжений и касательных (τ) напряжений для пластического состояния сечения балки показаны на рис. 11.

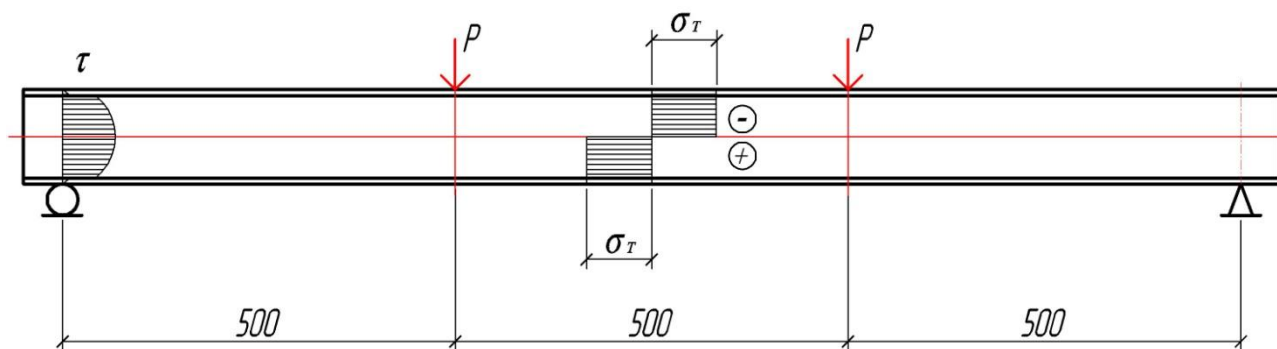


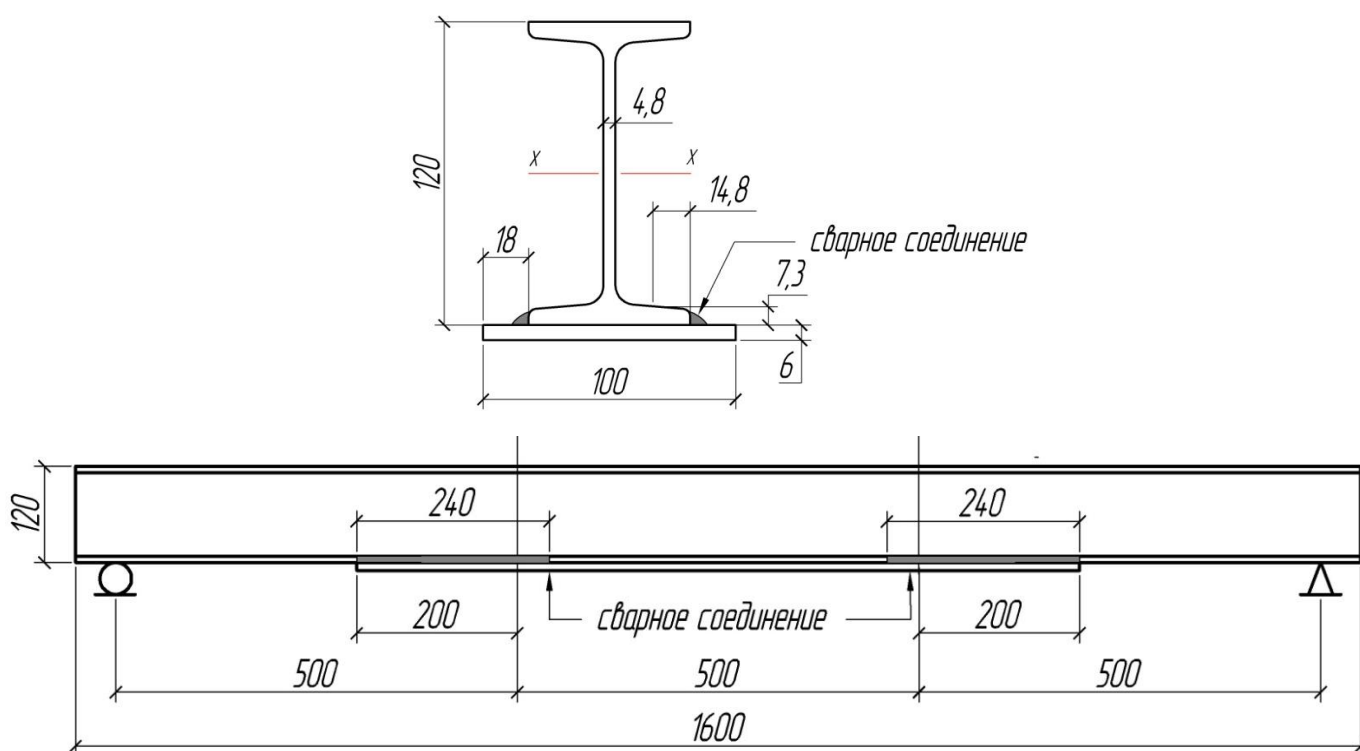
Рисунок 11 – Эпюры нормальных и касательных напряжений пластической работы (условный пластический шарнир).

При дальнейшем нагружении напряжения текучести продолжают распространяться и в пределе пронизывают всё сечение. Наступает напряженно-деформированное состояние 3-го класса, когда по всей площади сечения $|\sigma| = \sigma_y$, т.е. у рассматриваемого нами двутавровом сечения

наступает пластическое состояние [28, п. 4.2.7]. Такое состояние называют «условным шарниром пластичности».

2.2 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного полосой, прикрепленной к нижней полке на сварке

Усиление двутавра производится полосовым элементом: сечение 100х6мм, длиной 900 мм в соответствии с рис. 12.



Масштаб: торец балки - 1:2, вид сбоку - 1:10

Рисунок 12 – Схема усиления

Расчет образца, усиленного путем увеличения сечения на несущую способность также ведется из расчета теории чистого изгиба, но, так как при усилении поперечное сечение изменяется, то и меняется центр тяжести, что в свою очередь меняет момент сопротивления в сечении относительно оси x .

Для определения нормальных напряжений необходимо определить положение горизонтальной оси с учётом изменения сечения: прикрепления

полосы. Для этого необходимо определить центр тяжести нового сечения. Расчет центра тяжести ведется относительно оси x – рис. 13.

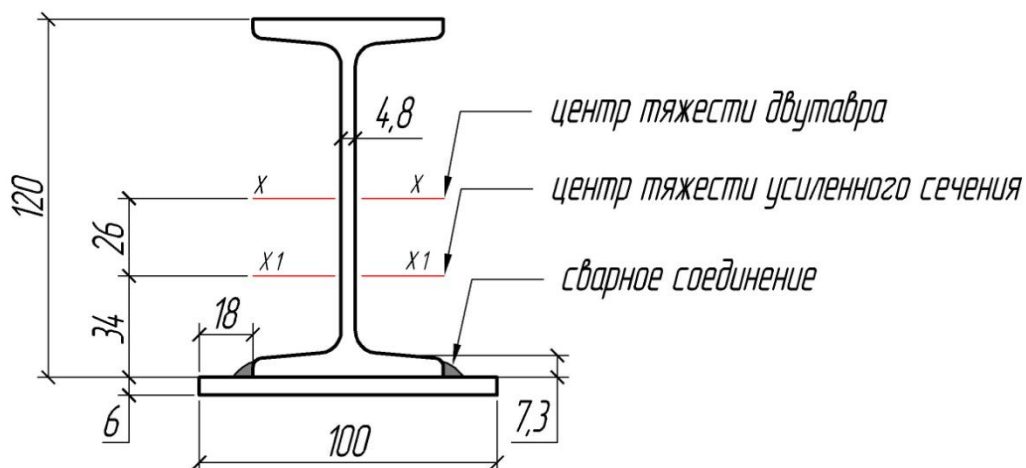


Рисунок 13 – Усиленное сечение

Центр тяжести относительно оси x для усиленного элемента определяется по формуле 10:

$$y_{ц.т.} = \frac{\sum S_x}{\sum A} = \frac{10 \cdot 1 \cdot 6.3}{14.7 + 10 \cdot 1} = 26 \text{ мм} \quad (10)$$

где: $\sum A$ – сумма площадей;

$\sum S_{x1}$ – сумма статических моментов относительно оси x .

В соответствии с формулой 10 центр тяжести усиленных увеличением сечения образцов, относительно центра тяжести эталонного образца, смещен на $y_{max} = 2.6$ см относительно оси x .

Для определения момента сопротивления сечения усиленной балки необходимо определить момент инерции относительно оси x_1 . Момент инерции определяется по формуле 11, в соответствии с рис. 13:

Момент инерции усиленного сечения относительно оси x :

$$\begin{aligned} I_x &= I_x^{дв} + A_{дв} \cdot 2.6^2 + 10 \cdot 1^3/10 + 10 \cdot 1 \cdot 3.7^2 = \\ &= 350 + 14.7 \cdot 2.6^2 + 10 \cdot 1^3/10 + 10 \cdot 1 \cdot 3.7^2 = 587.27 \text{ см}^4 \end{aligned} \quad (11)$$

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси x для растянутого волокна определяется по формуле 12:

$$W_x^{\text{раст}} = \frac{I_x}{3.7} = \frac{587.27}{3.7} = 158.7 \text{ см}^3, \quad (12)$$

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси x для сжатого волокна определяется по формуле 13:

$$W_x^{\text{сж}} = \frac{I_x}{3.7} = \frac{587.27}{8.6} = 68,3 \text{ см}^3. \quad (13)$$

Так как $W_x^{\text{сж}} < W_x^{\text{раст}}$, максимальная нагрузка на момент наступления текучести будет определяться в данном случае для сжатых волокон находится по формуле 14:

$$P_{\text{max}} = \frac{W_x^{\text{сж}} \sigma_T}{a} \quad (14)$$

где σ_T – предел текучести СтЗпс (в дальнейшем определен по испытанию эталонного образца);

a – расстояние от опоры до приложенных двух сосредоточенных нагрузок P_{max} ;

$W_{x1}^{\text{сж}}$ – момент сопротивления сечения относительно оси x_1 ,
определенный по формуле 13.

Максимальный расчетный изгибающий момент, при моменте сопротивления для растянутых волокон, для усиленного образца определяется по формуле 15, также исходя из эпюры моментов указанных на рис. 8:

$$M_{\text{max}} = 0,5P_{\text{max}}, \quad (15)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка, которую может воспринимать усиленный стальной двутавр, определенная по формуле 14.

Моменты сопротивления усиленного сечения для растянутого $158,7 \text{ см}^3$ и сжатого $68,3 \text{ см}^3$ волокон довольно значительно больше момента сопротивления неусиленного двутавра ($W_x = 58,4 \text{ см}^3$): в 2.72 и 1.16 раза, что является предпосылкой для вывода об эффективности предложенного варианта усиления. Для окончательного вывода необходимо проведение экспериментального исследования.

Расчет сварного соединения

Прикрепление усиливающего элемента (полосы) осуществляется при помощи сварки. Для расчёта швов выше была определена сила P .

Основной тип сварного соединения принято – нахлесточное соединение, без скоса кромок. Характер углового шва – односторонний. Условное обозначение сварного шва – Н1, который соответствует [7, таблица 1,53].

Длина швов будет определяться из условия работы на срез при действии сдвигающей силы.

Размеры сварных угловых швов и конструкция соединения должны удовлетворять следующим требованиям:

- катет углового шва k_f не должен превышать $1,2t$, где t - наименьшая из толщин свариваемых элементов;
- расчетная длина углового шва должна быть не менее $4k_f$ и не менее 40 мм.

Расчет сварного соединения с угловыми швами, при действии силы P , проходящей через центр тяжести соединения, следует выполнять на срез (условный) по одному из двух сечений как показано на рис. 14.

При условии $\frac{\beta_f R_{wf}}{\beta_z R_{wz}} \leq 1$ расчет сварного соединения с угловыми швами по металлу шва определяется по формуле 16:

$$\frac{P}{\beta_f k_f l_w R_{wf} \gamma_c} \leq 1 \quad (16)$$

При условии $\frac{\beta_f R_{wf}}{\beta_z R_{wz}} > 1$ расчет сварного соединения с угловыми швами по металлу границы сплавления определяется по формуле 17:

$$\frac{P}{\beta_f k_f l_w R_{wf} \gamma_c} \leq 1 \quad (17)$$

где в формулах 16 и 17:

l_w – расчетная длина швов в сварном соединении, равная суммарной длине всех его участков за вычетом по 1 см на каждом непрерывном участке шва;

β_f и β_z – коэффициенты, принимаемые по табл. 39 [28];

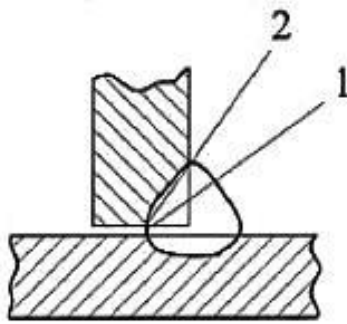
R_{wf} – расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу шва;

R_{wz} – расчетное сопротивление угловых швов срезу (условному) по металлу границы сплавления.

Требования к угловым швам представлены в таблице 6 в соответствии с [28] и учитывались при проведении испытания.

Таблице 6 – Требования к угловым швам

Требования к конструкции шва	Значения
Расчетная длина углового шва должна быть не менее $4k_f$ и не менее 40мм	$16\text{мм} \leq x \leq 40\text{мм}$
Расчетная длина флангового шва должна быть не более $85\beta_f k_f$	$\leq 238\text{мм}$
Размер нахлестки должен быть не менее пяти тощин наиболее тонкого из свариваемых элементов	$\geq 39\text{мм}$



1 – по металлу шва; 2 – по металлу границы сплавления

Рисунок 14 – Расчетные сечения сварного соединения с угловым швом.

Выводы по 2-й главе

1. При усилении балок следует стремиться к увеличению их изгибной жёсткости.
2. Наиболее эффективно для работы балок – симметричное усиление, что не всегда возможно в реальных условиях.
3. При усилении балки с присоединением полосы, прикрепляемой к нижней полке, наиболее слабой частью балки с позиции усиления становится верхняя зона.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В известной литературе нет информации о влиянии начальных нагрузок на работу стальных балок, усиливаемых под нагрузкой методом увеличения сечения.

В этой связи была поставлена **цель исследования** – получение информации о влиянии начальной нагрузки на несущую способность и деформации стальной балки, усиливаемой увеличением сечения с применением сварки.

«Испытания натуральных объектов динамической нагрузкой трудоемки и дорогостоящи и, как правило, не предоставляют возможности решить многие теоретические задачи, связанные со строительством зданий, их реконструкцией или усилением конструкций. Как показывает практика, испытания на моделях могут заменить натурные испытания и во многих случаях являются более эффективными. Принципиально на моделях можно решать любые задачи, возникающие на практике, при соответствующем техническом и экономическом обеспечении»[13]. На физических моделях можно решать огромное количество строительных задач, а именно:

- определение несущей способности и схемы разрушения;
- жесткости, устойчивости и выносливости элементов и модели в целом;
- определение напряжённо-деформированного состояния конструкций и сооружений как надземных, так и подземных;
- определение частот, амплитуд и форм колебаний сооружений при заданных динамических, сейсмических и взрывных воздействиях.

В этой связи решено было проводить экспериментальное исследование на образцах-моделях.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Испытание эталонного образца двутаврового сечения.
2. Испытание образца, усиливаемого полосой без нагрузки.

3. Испытание образца, усиливаемого полосой под нагрузкой с применением сварки.

3.1 Методика испытания

Для испытания были подготовлены три образца: двутавры №12 по ГОСТ [6], длиной 1600 мм (расстояние между опорами установки 1,5 м); форма поперечного сечения двутавра и представлена на рис. 15.

По приведенным данным из сертификата металла марка стали всех подготовленных образцов – Ст3пс, что соответствует ГОСТ 14637-89.

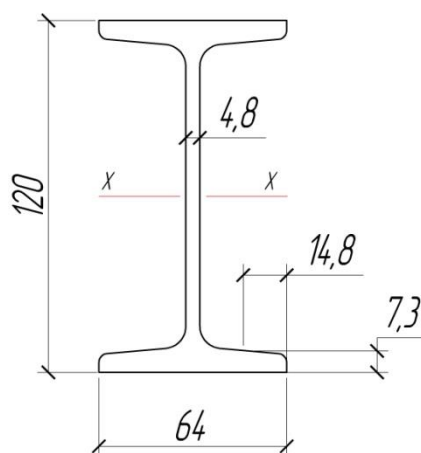


Рисунок 15 – Поперечное сечение двутавра

Номинальные размер двутавров, площадь поперечного сечения, масса и справочные значения для осей приведены в таблице 7 и соответствуют [6, п.4 таблица 1].

Таблица 7 – Справочные данные двутавра №12

№	Размеры					Площадь попер.сечения	Масса 1м	Справочные значения для осей						
								X – X				Y – Y		
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>R</i>			I_x	W_x	i_x	S_x	I_y	W_y	i_y
мм					см ²	кг	см ⁴	см ³	см	см ³	см ⁴	см ³	см	
12	120	64	4,8	7,3	7,5	14,7	11,5	350	58,4	4,88	33,7	27,9	8,72	1,38

Соответствие предельных отклонений размерам и форме поперечного сечения подготовленных образцов приведены в таблице 8, что в свою очередь соответствует [6, п. 4, табл. 2].

Таблица 8 – Соответствие предельных отклонений размеров и форме поперечного сечения.

Параметр, показатель качества		Размер, мм	Предельное отклонение при повышенной точности прокатки, мм	Соответствие
Высота h		От 140 до 180	+2.0	соответствует
Ширина полки b		От 73 до 92	+2.0	соответствует
Толщина полки t		До 7.5 включ.	-0.4	соответствует
Перекося полки Δ при ширине b		От 55 до 190 включ.	$\leq 0.02b$	соответствует
Отклонение от симметричности $\delta = (b_1 - b_2)/2$	При ширине b	От 73 до 90	2.0	соответствует
	Длина	До 8м включ.	+40	соответствует
Прогиб стенки f			≤ 0.15	соответствует
Кривизна двутавра			$\leq 0.2\%$ длины	соответствует
Притупление наружных кромок полок двутавров			Не контролируется	
Отклонения по массе 1м двутавра			+3% -5%	соответствует

Контроль размеров и геометрических форм проведен на расстоянии 500 мм от торцов двутавров. Контроль высот двутавров осуществлен в плоскости У

Соответствие поверхности подготовленных образцов проведено согласно с ГОСТ [6] и отображено в таблице 9.

Таблице 9 – Соответствие поверхности подготовленных образцов

Недопустимые дефекты	Соответствие
Трещины, рванина	Соответствует
Плены площадью более 1,5 см ²	Соответствует
Раскатанные пузыри и загрязнения, волосовины, закаты, вкатанная окалина, раковины от окисления, отпечатки, рябизна, усы, заусенцы, подрезы, продиры, риски, царапины, вмятины	Соответствует
Глубиной более 1 мм и (или) выступающие над поверхностью более 1 мм — при номинальной толщине элемента профиля до 10 мм включительно	Соответствует
Глубиной более 2 мм и (или) выступающие над поверхностью более 2 мм — при номинальной толщине элемента профиля свыше 10 до 50 мм включительно	Соответствует
Глубиной более 3 мм и (или) выступающие над поверхностью более 3 мм	Соответствует

В качестве элементов усиления балок были подготовлены две металлические полосы – 6х100 длиной 900 мм (табл. 10).

Усиление балок производилось согласно отправочному чертежу, указанному на рис. 12.

Таблица 10 – Таблица элементов, подготовленных для испытания

Отправочная марка	№ поз.	Кол-во	Сечение, мм	Длина, мм	Примечание
Б1	1	1	I 12	1600	Без усиления
Б2	2	1	I 12	1600	С усилением без нагрузки
	3	1	– 6x100	900	
Б3	4	1	I 12	1600	С усилением под нагрузкой
	5	1	– 6x100	900	

Установка для испытания на поперечный изгиб

Эксперимент был поставлен на «установке для испытания балочных конструкций», находящейся в ауд. № 105 «Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства» ТГУ.

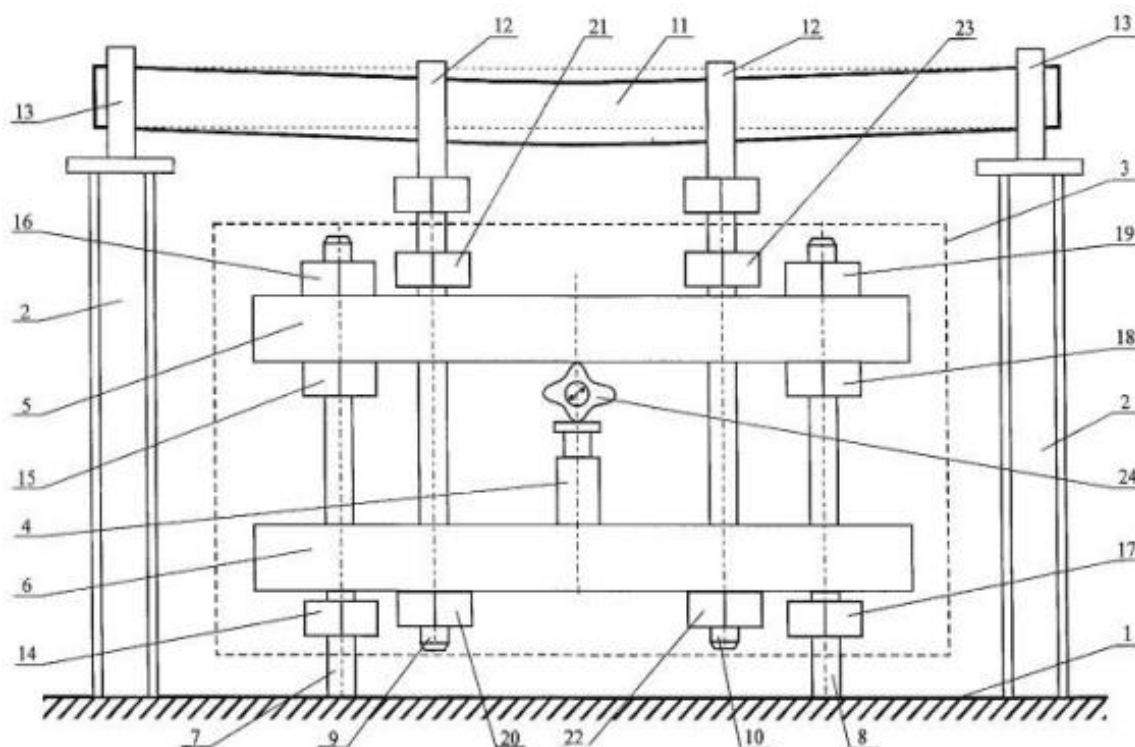


Рисунок 18 – Испытательный стенд

«Установка для испытания балочных конструкций работает следующим образом. Балочную конструкцию 11 устанавливают на опорные стойки 2 и закрепляют элементами 13. Тяги 9 и 10 посредством хомутов 12 закрепляют на балочной конструкции 11, подсоединив к ней тем самым нагружающее устройство. Подавая под давлением масло от насосной станции в источник дискретной нагрузки 4 (гидравлический домкрат одностороннего действия), нагрузка передается через реверсивный механизм 3. В зависимости от положения регулировочных гаек 14-23 на тягах 7 и 8 и 9 и 10 изменяют направление усилия, что дает возможность балочной конструкции 11 деформироваться в плоскости действия изгибающего момента со сменой стрелы прогиба. Для создания прогиба вниз гайки 14 и 17 и гайки 21 и 23 отворачивают, освобождая траверсу 6, давая ей свободный ход вниз под действием источника дискретной нагрузки 4, а гайки 16 и 19 поджаты к траверсе 5 и ограничивают ее движение вверх. Траверса 6 вывешивается на гайках 20 и 22, которые ограничивают ее движение вниз. Но при приложении усилия источником 4, траверса 6, опираясь на гайки 20 и 22, начинает тянуть вниз тяги 9 и 10, подвешенные на балочной конструкции 11, которые нагружают ее, создавая определенный изгибающий момент, действующий на балочную конструкцию 11 в местах установки тяг 9 и 10. Таким образом, осуществляют испытание балочной конструкции в одном направлении приложения изгибающего момента – положительном. Для изменения знака приложения изгибающего момента на противоположный, отрицательный, необходимо ослабить гайки 16, 20 и 19, 22, а гайки 14, 17 и 21, 23 поджать к соответствующим траверсам. Тогда при приложении усилия источником дискретной нагрузки 4 траверса 6 остается на месте и поджимается к гайкам 14 и 17, а траверса 5, получив свободу от гаек 16, 20 и 19, 22 и поджимаясь к гайкам 21 и 23 тяг 9 и 10, двигается вверх, поднимает вверх и тяги 9 и 10, которые воздействуют на неподвижную балочную конструкцию 11, создают изгибающий момент со стрелой выгиба вверх, при этом динамометр 24 фиксирует приложенное усилие. Таким образом, осуществляют испытание

балочной конструкции в другом направлении приложения изгибающего момента. Использование предлагаемого технического решения позволило создать несложную и компактную установку, позволяющую испытывать балочные конструкции без перестановки на знакопеременные нагрузки»[30].



Рисунок 16 – Вид испытательной установки с балкой

Нагрузка прикладывается симметрично поэтапно (каждый этап – 100 кг), к верхней полке в двух точках посредством траверсы и тросов на расстоянии 500 мм от крайних опор. Величина нагрузки контролируется по показаниям динамометра.

По мере нагружения каждого этапа будет снятие показаний по приборам, контролирующим прогибы и напряжения в середине пролета, что показано на рис.17.:

1. Прогибы – с помощью прогибомера Аистова.
2. Напряжения – рычажными тензometрами Гугенбергера.

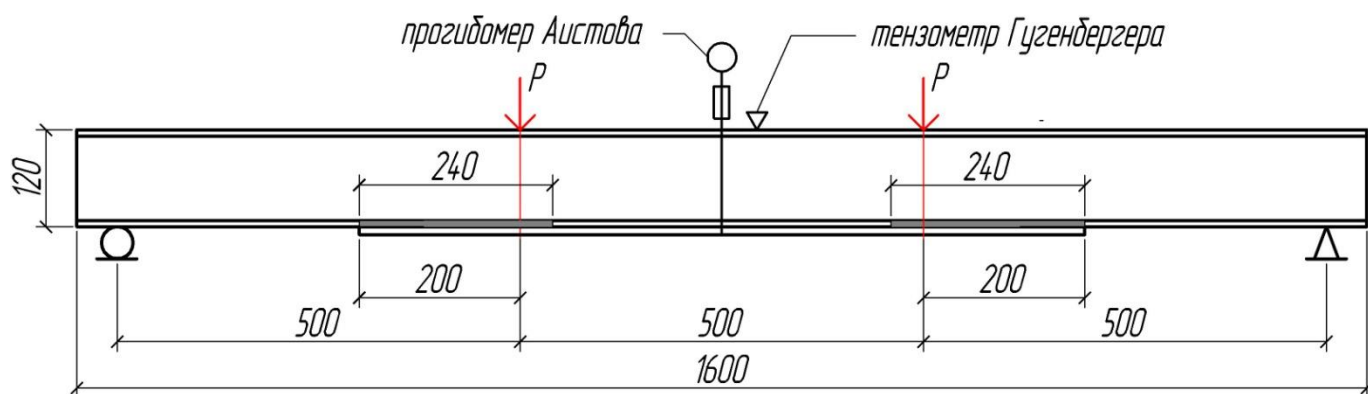


Рисунок 17 – Схема нагружения и расстановки приборов

Порядок проведения испытания для балок серии №1 (без усиления):

1. Установка балки на опоры (рис. 19).
2. Поэтапное нагружение по 100 кг.
3. На каждом этапе нагружения фиксируются показатели по прогибомеру Аистова и тензомеру Гугенбергера.
4. Фиксация предельной нагрузки на момент появления текучести образца.



Рисунок 19 – Испытание балки серии №1

Балка серии №2 перед нагружением усиливалась путём присоединения на сварке полосы (рис. 20).



Рисунок 20 – Прикрепление полосы к нижнему поясу испытываемой балки серии №2.

Далее испытание проводилось аналогично испытанию не усиленной балки.



Рисунок 21 – Испытание балки серии №2

После проведенного испытания балок серии №1 и №2, был произведен анализ результатов, что позволило разработать методику проведения испытания для балки серии №3.

Порядок проведения испытания для балки серии №3:

1. Установка балки без усиления на опоры (рис. 5).
2. Поэтапное нагружение по 100 кг до нагрузки, равной 80% предельной нагрузки для первого образца.
3. Производилось усиление полосой, привариваемой к нижней полке.
4. Нагружение по 100 кг до потери несущей способности.
5. Фиксация предельной нагрузки.



Рисунок 22 – Установленная на опоры установки балка серии №3

Прикрепление элемента усиления к балке под нагрузкой показано на рис. 23.



Рисунок 23 – Прикрепление полосы к нижнему поясу балки серии №3

Наплавка швов производилась ручной дуговой сваркой в соответствии с ГОСТ [7]. Марка электродов М-3 (ГОСТ [4]) в соответствии с ГОСТ [7].

Контроль качества сварных швов соединяемых элементов конструкции был проведен наружным осмотром 100% швов с проверкой размеров. В таблице 11 приведены требования к внешнему виду сварных швов и их соответствие со СНиП [29].

Таблица 11 – Требования к внешнему виду сварных швов

Требование к сварному шву	Соответствие требованиям
Гладкая или равномерная чешуйчатая поверхность (без наплывов, прожогов, сужений и перерывов) и не иметь резкого перехода к основному металлу	Соответствует
Наплавленный металл должен быть плотный по все длине шва, не иметь трещин и дефектов, выходящих за пределы, указанные в СНиП III-18-75 Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции п.1.56	Соответствует
Все кратеры должны быть заварены	Соответствует

3.2 Результаты испытания эталонной балки

Результаты испытаний эталонной балки занесены в табл. 12 и отображены на рис. 24.

Таблица 12 – Результаты испытания эталонной балки

Серия	Усиление	Пред. нагр., кН	Пред. нагр., тн	Прогиб, мм
1	–	48,02	4,9	6,05

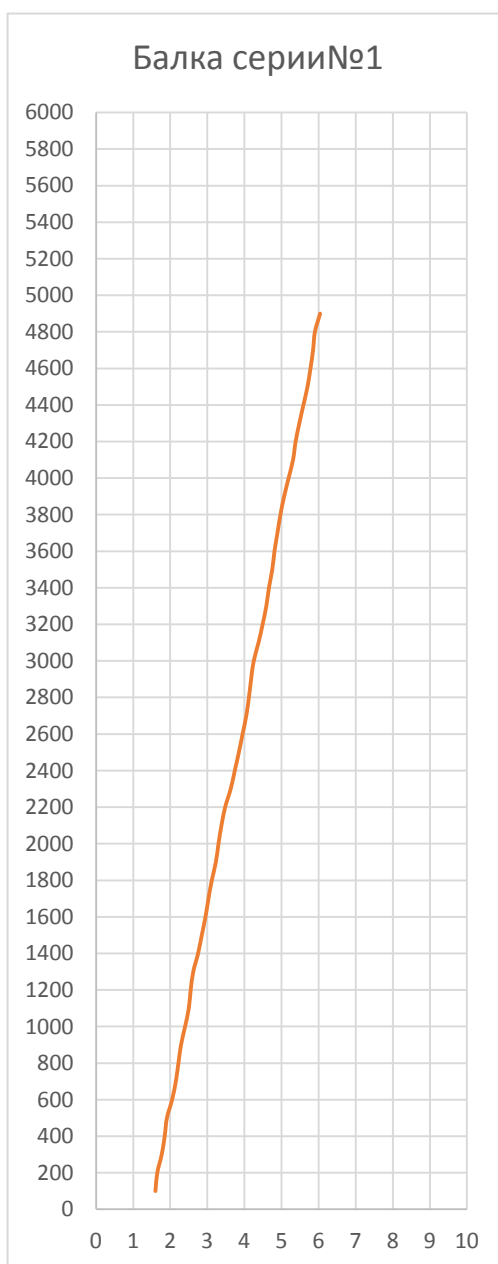


Рисунок 24 – Диаграмма прогиб – нагрузка
ось x – прогиб, ось y – приложенная нагрузка

Испытание эталонного образца без усиления испытывалось для определения несущей способности. В ходе проведения было выявлено, что заявленный в сертификате №2004694 «ЕВРАЗ ЗСМК» предел текучести стали Ст3пс оказался выше и составил 411 МПа вместо 325 МПа.

3.3 Результаты испытания балки, усиленной без нагрузки

Результаты испытаний балки, усиленной без нагрузки занесены в табл. 13 и отображены на рис. 25.

Таблица 13 – Результаты испытаний балки, усиленной без нагрузки

Серия	Усиление, мм	Пред. нагр., кН	Пред. нагр., тн	Прогиб, мм
2	-6×100	53,9	5,6	9,12

В ходе испытания было подтверждено экспериментальным способом, что усиление методом увеличения сечения балки полосой, прикреплённой к нижней полке эффективно. Об этом говорит предельная нагрузка, равная 5,6тн, в отличие от эталонной балки, где предельная нагрузка составляет 4,9тн.

Вид усиленной балки серии №2 после испытания показан на рис. 26.



Рисунок 26 – Вид усиленной балки из серии №2 после испытания

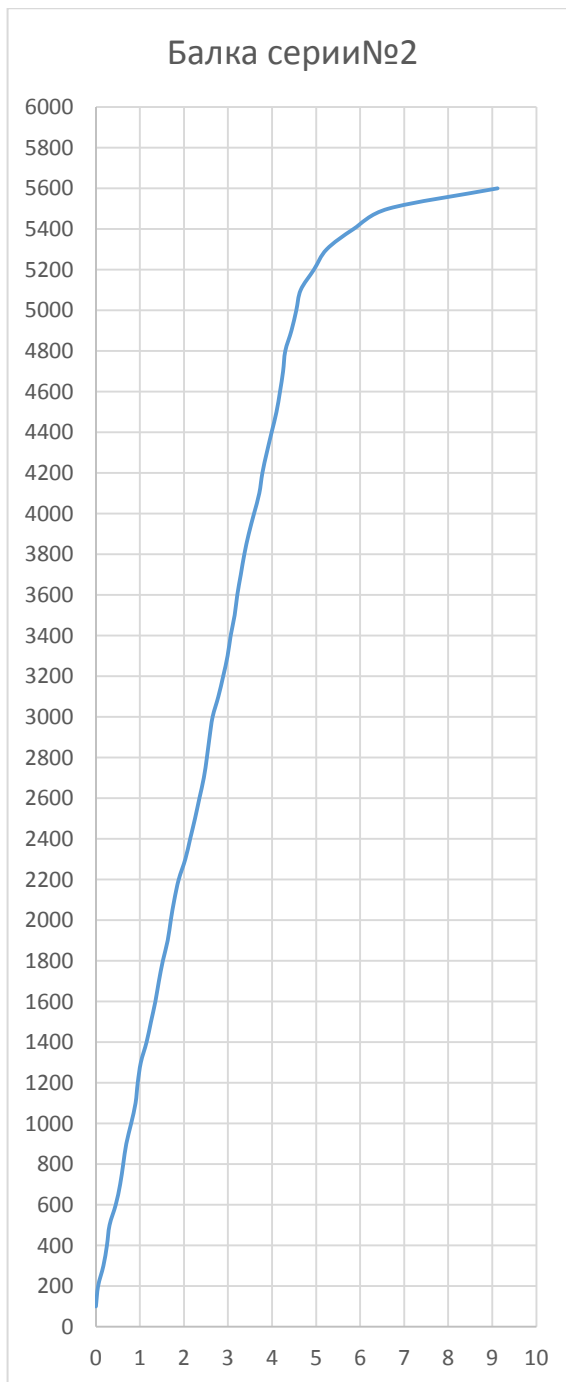


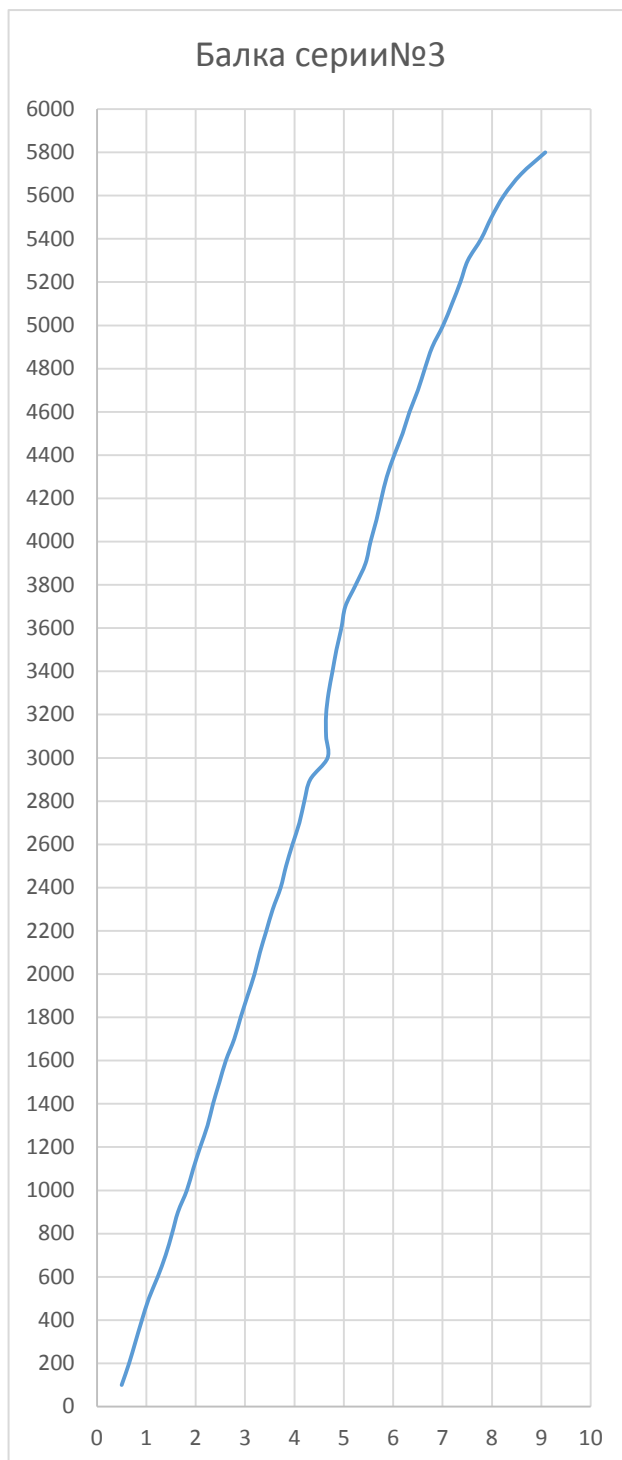
Рисунок 25 – Диаграмма прогиб – нагрузка
ось x – прогиб, ось y – нагрузка

3.4 Результаты испытания балки, усиленной под нагрузкой

Результаты испытаний балки усиленной под нагрузкой (серия №3) занесены в таблицу 14 и отображены на рис. 27.

Таблица 14 – Результаты испытаний балки, усиленной под нагрузкой

Серия	Усиление	Пред. нагр., кН	Пред. нагр., тн	Прогиб, мм
3	-6×100	56,8	5,8	9,08



ось x – прогиб, ось y – нагрузка

Рисунок 27 – Диаграмма прогиб – нагрузка

Усиление балки проводилось при нагрузке равной 3 тн, что составило 61% от предельной нагрузки эталонной балки (серия №1), выявленной экспериментальным способом. До этой нагрузки работа балки была схожа с работой эталонной модели. В процессе прикрепления полосового элемента при нагревании наблюдались незначительные прогибы балки, равные 0,5 мм. При остывании элементов данные прогибы исчезали.

В результате проведенного испытания балки из серии №3 предельная нагрузка составила 5,6 тн, что незначительно выше предельной нагрузки усиленной балки серии №2; это превышение составляет 200 кг. Вид усиленной балки серии №3 после испытания показан на рис. 28.



Рисунок 28 – Вид усиленной балки серии №3 после испытания

3.5 Анализ полученных результатов

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси x для сжатого волокна определяется как

$$W_{x1}^{\text{сжат}} = \frac{I_x}{8,6} = \frac{587,27}{8,6} = 68,3 \text{ см}^3; \quad (18)$$

Теоретическая максимальная нагрузка определяется по сжатой зоне, как

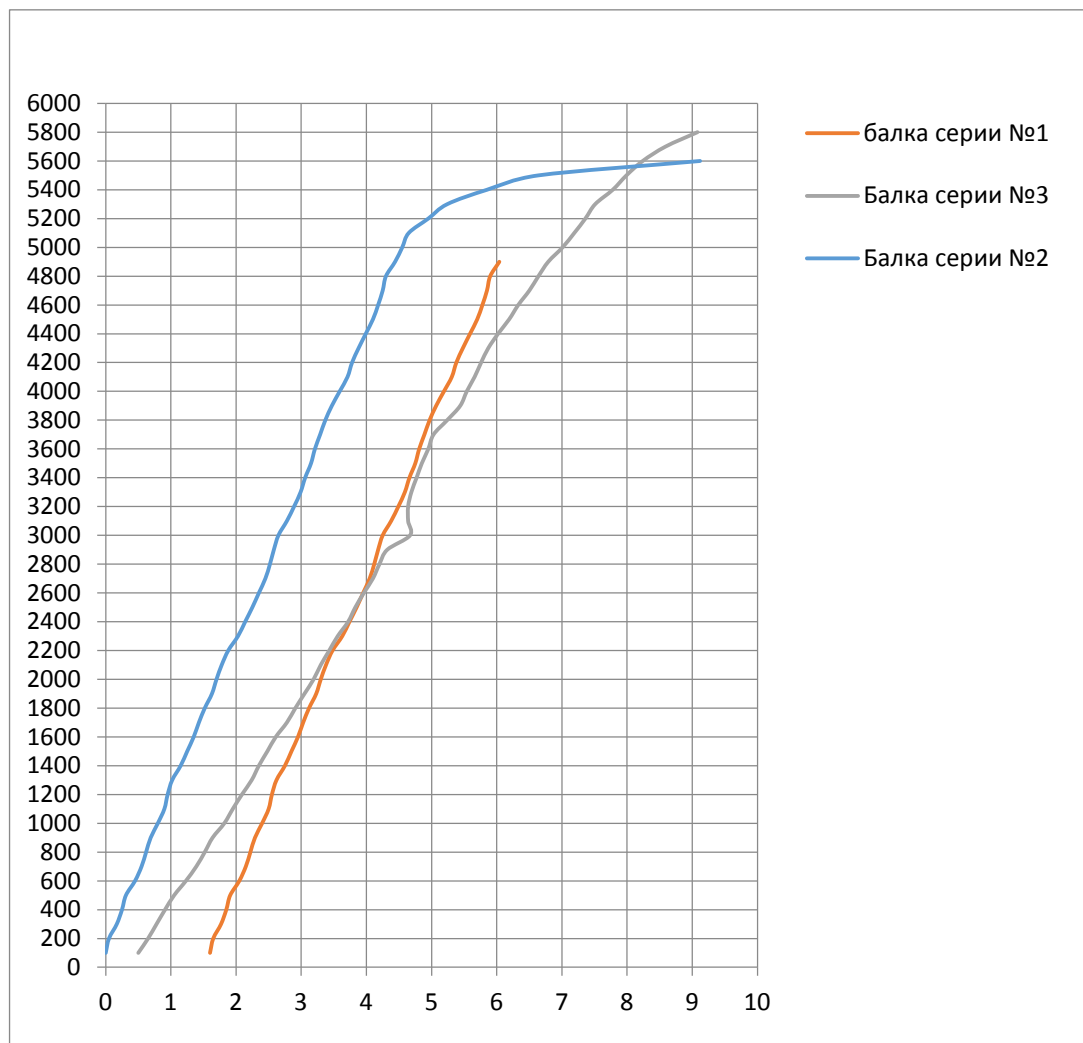
$$P_{max} = \frac{W_{x1}^{сж} \sigma_T}{a} = \frac{68,3 \text{ см}^3 411 \text{ МПа}}{50 \text{ см}} = 56,1 \text{ кН} = 5,6 \text{ тн}; \quad (19)$$

где σ_T – предел текучести СтЗпс (по испытанию эталонного образца);

a – расстояние от опоры до приложенных двух сосредоточенных нагрузок;

$W_{x1}^{сж}$ – момент сопротивления сечения брутто относительно оси x_1 .

Результаты испытаний эталонной балки, усиленной без предварительной нагрузки и балки усиленной под нагрузкой отображены на рис. 29.



ось x – прогиб, ось y – нагрузка

Рисунок 29 – Диаграмма прогиб – нагрузка

Экспериментально полученная величина предельной нагрузки абсолютно близка к теоретически определённой и составляет:

1. для усиленной балки без предварительного нагружения равна 5,6тн
2. для усиленной балки под влиянием предварительной нагрузки равна 5,8тн.

Выводы по 3-й главе

1. Усиление балки путем прикрепления полосы к нижней полке является недостаточно эффективным.
2. Наиболее эффективно для работы балок – симметричное усиление, что не всегда возможно в реальных условиях.
3. Величина начальной нагрузки практически не влияет на несущую способность усиленной балки.
4. В процессе усиления нагруженной конструкции имеет место небольшое увеличение прогиба – 0,4 мм, что абсолютно безопасно с позиции эксплуатации балки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи по обеспечению дальнейшего безопасного использования зданий и сооружений. При проведении реконструкции или технического перевооружения, в процессе возникает необходимость усиления металлических ригелей (балок).

Результаты проведённого исследования позволили дать новые трактовки напряжённого состояния усиливаемых стальных балок, с начальными прогибами в плоскости сечения элементов.

Была предложена методика усиления балки путем увеличения сечения при помощи прикрепления полосы к нижней полке балки двутаврового сечения, тем самым увеличив несущую способность.

Произведенные в работе исследования позволили сделать следующие выводы:

1. При усилении балок следует стремиться к увеличению их изгибной жёсткости.
2. При усилении балки с присоединением полосы, прикрепляемой к нижней полке, наиболее слабой частью балки с позиции усиления становится верхняя зона.
3. Усиление балки путем прикрепления полосы к нижней полке является недостаточно эффективным.
4. Наиболее эффективно для работы балок – симметричное усиление, что не всегда возможно в реальных условиях.
5. Величина начальной нагрузки практически не влияет на несущую способность усиленной балки.
6. В процессе усиления нагруженной конструкции имеет место небольшое увеличение прогиба – 0,4 мм, что абсолютно безопасно с позиции эксплуатации балки.
7. Предложенные методики расчёта несущей способности усиленных балок позволяют получить достоверные результаты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский, М.Р. Усиление стальных конструкций / Бельский М.Р., Лебедев А.И. – Киев : “Будівельник”, 1981. – 120 с.
2. Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения Текст. / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. — М. : Стройиздат, 1968. –206 с.
3. Валь, В.Н. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции / В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров. – М. : Стройиздат, 1987. – 220 с.
4. Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. – М.: Стройиздат, 1987. – 220с. – (Наука – строит. Пр-ву).
5. Горев, В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Конструкции зданий: Учеб. для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И.Белый и др.; Под редакцией В.В. Горева. – 2–е изд., испр. – М. : Высш. Шк.,2002. – 528с.
6. ГОСТ 8239-89Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.
7. ГОСТ 5264-80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры».
8. ГОСТ 12.3.003-86 «Работы электросварочные. Техника безопасности».
9. ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики (с Изменениями №1, 2)».
10. ГОСТ 3242-79 «Соединения сварные. Методы контроля качества».
11. ГОСТ 2246-70 «Проволока стальная сварочная. Технические условия (с Изменениями N 1-5)».
12. Дмитриев, Ф.Д. Крушение инженерных сооружений / Дмитриев Ф.Д. –М. : Стройиздат, 1953. – 140 с.

13. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление восстановление и ремонт / Иванов Ю.В. – М. : АСВ, 2012. – 312 с.
14. Игнатъева, В.С. Метод "фиктивных температур" как основа исследований в области напряженно деформируемого состояния сварных соединений. Металлические конструкции в строительстве. - Труды / Игнатъева В.С. – МИ-СИ им. Куйбышева, 1979, №152, с. 71-88.
15. Ибрагимов, А.М. Сварка строительных металлических конструкций: Учебное пособие / А.М. Ибрагимов, В.С. Парлашкевич - М. : Издательство АСВ, 2015.
16. Колесников, В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой / В. М. Колесников. Л., 1967. - 24 с.
17. Лащенко, М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений/ М.Н. Лащенко. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1969. -184с.
18. Металлические конструкции. В 3т. Т.3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений: Справочник проектировщика. /Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИ проект стальнойконструкция им. Н.П. Мельникова). – М. : изд-во АСВ, 1999. – 527 с.
19. Металлические конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов / Г.С. Ведеников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатъева и др.; Под ред. Г.С. Веденикова. - 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1998. - 760 с.: ил. ISBN 5-274-01465-8
20. Металлические конструкции : учебник / Ю. И. Кудишин [и др.] ; под ред. Ю. И. Кудишина. - 11-е изд., стер. ; Гриф МО. - М. : Академия, 2008. - 681с. : ил. - (Высш. проф. образование).
21. Металлические конструкции. Справочник проектировщика в 3 томах / Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальнойконструкция им. Н.П.Мельникова) — М. : изд-во АСВ, 1998-99. – 528с.

22. Мизюмский, И.А. Аварии и крушения стальных конструкций и исследование причин разрушения сварных стыков уголков. Кандидатская диссертация/ И.А. Мизюмский —ЛИСИ, 1959.
23. Мандриков, А.П. Примеры расчета металлических конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург :Лань, 2012. — 432 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/9466> (дата обращения: 12.09.19).
24. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций / Укр-нии-проектстальконструкция.-М.: Стройиздат, 1989. – 159 с.
25. Рекомендации по усилению стальных конструкций производственных зданий и сооружений энергопредприятий.
26. РТМ 1652-9-89 Руководство по инженерно-техническому обследованию, оценке качества и надежности строительных конструкций зданий и сооружений.
27. Руководство по усилению элементов металлоконструкций с применением сварки. ЦНИИпроектстальконструкция. М. : 1979, 15 с.
28. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. [Текст]. – введ. 28.08.2017. – Москва: Минстрой России, 2017. – 140 с. (дата обращения: 20.12.19)
29. СНиП III-18-75 «Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции».
30. УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ Ерышев В.А., Колганов Ю.А., Горшенина Е.В. Патент на изобретение RU 2262698 С1, 20.10.2005. Заявка № 2004120086/28 от 01.07.2004
31. Шкинев, А.Н. Аварии в строительстве. - 4-е изд., перераб. и доп. / Шкинев А.Н. - М. : Стройиздат, 1984.
32. Al-Sulaimani, G.J., M. Kaleemullah, I.A. Basunbul, I.A. Rasheeduzzafar, 1990. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. Struct. J., 87(2): 220-231.

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