

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 Обоснование эффективности расположения усиливающих
элементов при усилении прокатных балок с расположением плит на верхнем
поясе

Студент

А.В. Вычиков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд.техн.наук, доцент, И.К. Родионов

руководитель

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

Тольятти 2021

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Основные положения по теме исследования	7
1.1 Общие характеристики металлоконструкций.....	7
1.2 Классификация и причины повреждений (аварий) металлических конструкций.....	13
1.3 Особенности усиления металлических конструкций	23
1.4 Особенности конструкции и работы стальных балок	30
1.5 Усиление стальных балок методом увеличения сечения	49
Глава 2 Теоретическое исследование работы балок	65
2.1 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра.....	65
2.2 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного полосой, прикрепленной к нижней полке на сварке	72
2.3 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного двумя полосами - 50x10 симметрично с двух сторон стенки на сварке	77
2.4 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного двумя полосами - 100x10 симметрично с двух сторон стенки на сварке	78
2.5 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного двумя уголками L75x6 симметрично с двух сторон стенки на сварке	79
Глава 3 Экспериментальное исследование	81
3.1 Методика испытания балок	81
3.2 Результаты испытания образца марки Б1, эталонной балки.....	88
3.3 Результаты испытания образца марки Б2, усиленного полосой 100x10 прикрепленной к нижней полке.....	91

3.4 Результаты испытания образца марки Б3, усиленного двумя полосами 50x10, прикрепленными с двух сторон стенки симметрично	95
3.5 Результаты испытания образца марки Б4, усиленного двумя полосами 100x10, прикрепленными с двух сторон стенки симметрично	99
3.6 Результаты испытания образца марки Б5, усиленного двумя уголками L 75x6, прикрепленными с двух сторон стенки симметрично	103
Заключение	107
Список используемой литературы	107

Введение

Актуальность исследования. На сегодняшний день применение металлоконструкций при возведении зданий и сооружений различного назначения является наиболее динамично развивающимся сегментом в строительной индустрии Российской Федерации. Такие конструкции применяются в качестве каркасов быстровозводимых сооружений, пролетных конструкций транспортных мостов, конструктивных элементов покрытий и перекрытий и прочее.

В то же время различные эксплуатационные факторы, такие как силовые и температурные воздействия, действия агрессивной окружающей среды, могут значительно снизить несущую способность и сократить жизненный цикл любой металлической конструкции.

Актуальность темы нашего исследования заключается в том, что строительные конструкции, которые должны осуществлять свою функцию, не создавая при этом угрозы жизни и здоровью людей и их имуществу, необходимо своевременно и с минимальными потерями усиливать и восстанавливать. Необходимо предусмотреть такой способ усиления, который сведет к минимуму затраты, а также потери, вызванные простоем производства.

Под усилением металлических конструкций следует понимать различные способы восстановления их проектных характеристик (несущей способности и устойчивости), сниженных в процессе эксплуатации конструкций из-за влияния различных механических, химических и электрохимических факторов.

При грамотном усилении металлических конструкций можно получить необходимые показатели и подобрать максимально простую и эффективную схему выполнения производственных работ.

В процессе эксплуатации зданий и сооружений зачастую возникают ситуации, требующие усиления металлических балок и ригелей.

Балочные конструкции выполняют в каждом здании важную задачу. Расположенные в перекрытиях между этажами, эти изгибаемые элементы служат опорной поддержкой для плит. Принимая на себя массу всего, что размещается выше их уровня, эти конструкции подвергаются значительному вертикальному давлению.

Определяющими показателями работы балочного элемента являются прочность и жесткость. В случае недостаточности прочностных показателей и показателей жесткости для обеспечения эксплуатационных качеств необходимо усиление. Одним из способов увеличения несущей способности и жесткости балок является увеличение их сечения. Благодаря проведению работ по усилению можно значительно сэкономить средства и увеличить срок службы конструкций, в результате чего сооружение снова возвращается к своей нормальной жизни.

По вопросу усиления стальных балок были изучены различные источники: рекомендации по усилению, учебные издания. В общем, проблема усиления металлоконструкций и восстановление их несущей способности отражена в трудах следующих отечественных ученых: Стрелецкий Н.С., Беленя Е.И., Веденников Г.С., Лессиг Е.Н., Муханов Г.Г., Балдин В.А., Ведеников Г.С., Кошутин Б.Н., Уваров Б.Ю., Пуховский А.Б., Лебедев А.Н. В их научных трудах затронуты вопросы проектирования строительных металлических конструкций, их работа при различных видах нагрузений и некоторые конструктивные решения усиления. При этом, проведенный нами поиск в технической литературе выявил лишь отдельные разрозненные данные и рекомендации фрагментарного характера касательно исследуемой в данной работе схемы усиления стальных прокатных балок с расположением плит на верхнем поясе приведено в работах [3]- [5].

Цель исследования заключается в обосновании рациональности схем усиления балок с расположением нагрузки на верхних поясах в случае применения метода увеличения сечения.

Задачи диссертационной работы:

- Теоретическое обоснование работы балок с различными вариантами усиления.
- Экспериментальное исследование работы усиленных балок.
- Анализ полученных результатов.

Предметом исследования является эффективность расположения усиливающих элементов при усилении стальных балок с расположением плит на верхнем поясе.

Объект исследования – стальная прокатная балка двутаврового сечения.

Методы исследования. В ходе проведения работы были применены теоретические и экспериментальные методы исследования.

Научная новизна диссертационной работы являются результаты теоретического и практического исследования стальной, усиливаемой увеличением сечения балки с расположением плит перекрытия на верхнем поясе.

Практическая значимость состоит в том, что полученную схему усиления можно эффективно использовать для решения строительных задач при усилении стальных балок с расположением плит на верхнем поясе.

Апробация работы: результаты проводимого исследования докладывались и обсуждались на студенческой конференции, а также опубликовывались в периодических изданиях:

– конференция «Студенческие дни науки», Тольяттинский государственный университет (Тольятти, 2021 г.);

– инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей IV международной научной конференции. 22-23 апреля 2021 г. Часть 1. - Волгоград: ООО «Конверт», - 2021. – 248 с.

Глава 1 Основные положения по теме исследования

1.1 Общие характеристики металлоконструкций

Современные здания и инженерные сооружения не могут успешно функционировать без таких универсальных конструкций, как металлоконструкции, в особенности, если требуются значительные пролеты, высота и нагрузки. Необходимость в металлических конструкциях очень велика и непрерывно увеличивается.

Металлические конструкции отличаются большим разнообразием систем и конструктивных форм, но в тоже время, они связаны между собой двумя основными факторами. Во-первых, исходным материалом для всех конструкций считается прокатный металл, выпускаемый по единому виду, сорту, размеру, типу изделия. Во-вторых, все конструкции имеют единый технологический процесс изготовления, в основе которого лежит холодная обработка металла, и обладают единым видом соединения деталей в конструктивные элементы (на сварке и на болтах).

Металлические конструкции имеют следующие достоинства:

- надежность, обеспечивается за счет однородной мелкозернистой структуры металла и его упругих свойств;
- легкость, несмотря на высокую плотность стали, несущие металлоконструкции являются достаточно легкими. За показатель легкости принимают соотношение плотности и прочности металла;
- непроницаемость, благодаря высокому уровню плотности, металлы непроницаемы для жидкостей и газов;
- индустриальность, металлоконструкции изготавливают на заводах с помощью современного автоматизированного оборудования, а монтаж на строительной площадке производят механизированным способом, что ускоряет ввод в эксплуатацию конструкции, а также минимизирует или полностью исключает тяжелый ручной труд.

Но при этом металлоконструкции не лишены и недостатков, среди которых:

– коррозия, проблема коррозии гораздо более серьезная, нежели ей, зачастую, придают значение. Коррозия в буквальном смысле может съесть 10-20 процентов годового производства стали: металлоконструкции, изделия, оборудование и прочее. Несмотря на то, что в нашей стране накоплен некоторый опыт проведения исследований и разработок новых материалов и технологий с целью определения эффективных методов защиты, но тем не менее на сегодняшний день пока не удалось создать такого средства, которое бы полностью защитило металлы и сплавы от пагубного коррозионного воздействия. Пока мы имеем только возможность для замедления процесса коррозии и нивелирования негативных последствий. Данные задачи можно решить с помощью применения широкого ряда антикоррозионных средств и технологий;

– сравнительно небольшая огнестойкость, сталь представляет собой негорючий материал, но, как и все материалы, которые используются в строительстве, не может в течение относительно длительного времени выдержать воздействие высокой температуры, которая возникает при пожаре внутри здания. В среднем фактический предел огнестойкости стальных конструкций составляет всего 15 минут. Это можно объяснить достаточно быстрым снижением во время пожара деформационных и прочностных характеристик металла в условиях повышенных температур.

В случае, если фактический предел огнестойкости не соответствует требуемому, следует применять средства для его повышения. К указанным средствам относятся конструктивная огнезащита и тонкослойные огнезащитные покрытия. К наиболее оптимальным вариантам можно отнести нанесение вспучивающейся краски и сравнительно новый способ-монтаж огнеупорного одеяла (мата).

При проектировании металлоконструкций учитываются следующие основные требования:

- соответствия условиям эксплуатации;
- экономия металла;
- удобная транспортировка;
- технологичность в изготовлении;
- долговечность (физический и моральный износ; физический износ связан с процессами коррозии, а также с повреждениями и дефектами, а моральный – с изменением условий эксплуатации);
- скоростной монтаж;
- эстетичность (гармоничные формы).

К основным направлениям развития металлостроительства относятся:

- снижение массы конструкций;
- технологичность в изготовлении;
- технологичность в монтаже;
- снижение стоимости эксплуатации конструкций.

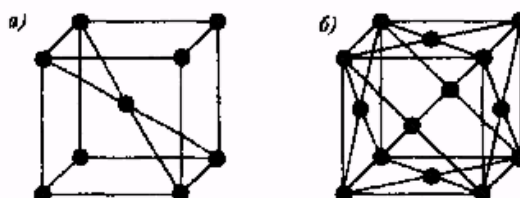
Развитие данных направлений в изготовление металлоконструкций может осуществляться через принцип типизации и унификации конструкций (типовые серии, типовые здания). Что приводит к повышению качества проектирования, изготовления и монтажа конструкций, а также к снижению стоимости их возведения и эксплуатации.

Металл для металлоконструкций выбирают на стадии проектирования, основываясь на результатах технико-экономического анализа. Необходимо отметить, что в большинстве случаев для изготовления металлоконструкций, благодаря своим прочностным характеристикам, применяют прокатные низкоуглеродистые и углеродистые стали.

В ГОСТ Р 54384-2011 применен следующий термин с соответствующим определением: сталь – материал (сплав железа с углеродом), в котором массовая доля железа больше, чем массовая доля какого-либо другого элемента, а массовая доля углерода составляет менее 2%, и в состав которого входят также и другие химические элементы.

В твердом состоянии сталь является поликристаллическим телом, состоящим из множества различно ориентированных кристаллов (зерен), при этом, чем мельче зерно, тем выше качество металла.

Для стали характерны кубические кристаллические решетки (рисунок 1):



а – объемно-центрированная (ОЦК), б – гранецентрированная (ГЦК)

Рисунок 1 – Кристаллическая решетка стали

Структура стали зависит от условий кристаллизации, химического состава, режима термообработки и прокатки.

Сталь, в которой присутствуют легирующие элементы (усложняющие ее химический состав), называется легированной. При легировании происходит увеличение количества очагов кристаллизации и, как следствие, образование мелкозернистой структуры, что делает сплавы более прочными.

Качество стали, из которой изготавливают металлоконструкции, определяется совокупностью ее механических свойств: «сопротивлением статическим воздействиям (временным сопротивлением и пределом текучести при растяжении); сопротивлением динамическим воздействиям и хрупкому разрушению (ударной вязкостью при различных температурах); показателями пластичности (относительным удлинением); сопротивлением расслоению (изгибом в холодном состоянии)»[43].

К тому же, качество стали определяется еще и сопротивлением многократному нагружению (усталостью), свариваемостью и коррозионной стойкостью.

Общей классификации сталей и сплавов не существует, потому что многие из них можно применять в самых различных областях промышленности, поэтому стали обычно классифицируют:

– по химическому составу: углеродистые (без легирующих элементов), низколегированные, легированные, высоколегированные.

– по качеству: сталь обыкновенного качества, качественная, высококачественная и особо качественная.

– по степени раскисления: кипящие (неокисленная сталь с высоким содержанием неметаллических примесей), спокойные (полностью раскисляется с минимальным содержанием шлаком и неметаллических примесей) и полуспокойные.

Прокатная сталь, применяемая в стальных конструкциях, делится на две группы:

– сталь прокатная листовая: тонколистовая – толщиной до 4 мм. (используется в изготовлении гнутых профилей, для кровельных покрытий); толстолистовая – толщина равна 4-160 мм, ширина равна 0,6-3,8 м, длина равна 6-12 м (используется в листовых конструкциях и в элементах сплошных систем, таких как балки, колонны, рамы); широкополосная универсальная - толщина равна 6-60мм, ширина равна 0,2–1,5м, длина равна 5–12м; просечно-вытяжная - толщина равна 4,5–6мм; полосовая сталь - ширина до 200мм (используется для диафрагм, ребер жёсткости); рифлёная сталь: толщина равна 2,5–8мм;

– сталь профильная – уголки, швеллеры, двутавры, тавры, трубы и т.п.

Марку стали выбирают на основе вариантного проектирования и технико-экономического анализа с учетом по СП 16.13330.2017 [36]. Выбор марки стали для строительных конструкций зависит от следующих параметров, влияющих на работу материала:

– толщина элементов конструкции;

– способ соединения элементов металлоконструкций;

– воспринимаемые динамические и статические нагрузки;

– климатические условия при монтаже и эксплуатации металлоконструкции;

– степень ответственности возводимых зданий и сооружений;

– уровень воспринимаемых напряжений.

В зависимости от условий работы материала все виды металлоконструкций разделены на четыре группы в соответствии по СП 16.13330.2017 [37]:

В 1 группу входят сварные конструкции или их элементы, работающие в особо тяжелых условиях, в том числе максимально стесняющих развитие пластических деформаций, или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок (балки крановых путей; балки рабочих площадок; балки путей подвесного транспорта; элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающих нагрузки от подвижных составов ит.д.);

Во 2 группу входят сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке при наличии растягивающих напряжений (фермы; ригели рам; балки перекрытий и покрытий и другие растянутые, растянуто-изгибаемые и изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы 1 при отсутствии сварных соединений и балки подвесных путей из двутавров при наличии сварных монтажных соединений.

В 3 группу входят сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке, преимущественно на сжатие (колонны; стойки; опорные плиты; элементы настила перекрытий; конструкции, поддерживающие технологическое оборудование и другие сжатые и сжато-изгибаемые элементы), а также конструкции и их элементы группы 2 при отсутствии сварных соединений.

В 4 группу входят вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, кроме указанных в группе 3; элементы фахверка; лестницы; трапы;

площадки; ограждения и т.п.), а также конструкции и их элементы группы 3 при отсутствии сварных соединений.

1.2 Классификация и причины повреждений (аварий) металлических конструкций

В процессе эксплуатации металлоконструкций, как показали наблюдения, происходит циклическое изменение их надежности, что главным образом, связано с изменчивостью величин нагрузок и изменением несущей способности в результате различных повреждений.

Для более полного понимания причин повреждений стальных конструкций рассмотрим классификацию, характер нагрузок и воздействий на металлоконструкции.

Временные нагрузки, в свою очередь, подразделяются на длительные, кратковременные и особые.

В соответствии по СП 20.13330.2016 [38] к постоянным нагрузкам следует относить: вес частей сооружений, в том числе несущих и ограждающих строительных конструкций; вес и давление грунтов (насыпей, насыпок), горное давление; гидростатическое давление.

Длительные нагрузки – это нагрузки, изменения расчетных значений которых в течение расчетного срока службы строительного объекта пренебрежимо мало по сравнению с их средними значениями. К данному пункту можно отнести: «вес перегородок, подливов, подбетонок; вес стационарного оборудования, инженерных коммуникаций; давление жидкостей, газов, сыпучих тел в емкостях; вес складированных материалов; температурные и технологические воздействия от оборудования; вес отложений производственной пыли; воздействия, обусловленные деформациями основания, изменением влажности, усадкой, ползучестью»[38].

Кратковременные нагрузки – это нагрузки, длительность действия расчетных значений которых существенно меньше срока службы сооружения. К кратковременным нагрузкам относятся: нагрузки от оборудования возникающие в пускоостановочном, переходном, испытательном режимах; при перестановке оборудования, вес людей и ремонтных материалов в зонах обслуживания оборудования, нагрузки от людей, животных, оборудования на перекрытиях жилых, общественных, сельскохозяйственных зданий с полными нормативными значениями; нагрузки от подвижного подъемно-транспортного оборудования, включая вес транспортируемых грузов, от транспортных средств, климатические (снеговые, ветровые, температурные, гололедные) нагрузки; нагрузки, возникающие при изготовлении, хранении и перевозке конструкций.

Особые нагрузки - это нагрузки и воздействия (например, взрыв, столкновение транспортных средств с частями сооружений, авария оборудования, пожар, землетрясение, некоторые климатические нагрузки, отказ работы несущего элемента конструкций), создающие аварийные ситуации с возможными последствиями.

«Расчет конструкций выполняется на действие нагрузок в различных сочетаниях. Одновременное действие постоянных, длительных и кратковременных нагрузок называется основным сочетанием. Вероятность одновременного воздействия наибольших нагрузок учитывается коэффициентами сочетаний» [4].

В своей книге «Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения» Беляев Б.И., и Корниенко В.С.[5]. описывают аварийные состояния металлоконструкций следующим образом: «выход из строя или отказ строительной конструкции – событие, после которого становится невозможной нормальная эксплуатация здания или сооружения без проведения соответствующих ремонтных или восстановительных работ.

К таким относят:

- 1) расстройство соединений элементов конструкций друг с другом;

2) местные нарушения целостности элементов и их соединений (трещины);

3) местные и общие деформации конструкций, превышающие норму;

4) предельный случай отказа – полный выход конструкции из строя, ее частичное или полное разрушение (авария).

В случае выхода из строя строительной конструкции, уже законченной монтажом или находящейся в эксплуатации, всегда возникает вопрос о ее надежности. Надежность конструкции обычно определяют как совокупность свойств, которыми обеспечивается ее бесперебойная нормальная эксплуатация в данных условиях» [27].

Крушения сооружений всегда привлекали к себе внимание ученых всего мира, поэтому существует множество различных подходов к составлению классификации аварий строительных конструкций. К примеру, советский ученый Ф.Д. Дмитриев классифицирует аварии по трем основным группам в зависимости от причин их возникновения [17]:

– аварии, вызванные такими природными явлениями как ураган, землетрясение, наводнение и прочее;

– наиболее обширная группа, куда относятся аварии, вызванные недостатками инженерно-технических приемов;

– аварии конструкций, вызванные различными социально-экономическими факторами.

К тому же в своих трудах он особо затрагивает технические причины катастроф, которые также выделяет в три группы: по потере устойчивости, по дефектам основания и некачественным работам.

Стоит особо отметить, что в основу его классификации легли данные о зарубежных авариях и крушениях мостов и гидротехнических сооружений и мало затрагивает аварии металлоконструкций гражданских и промышленных сооружений.

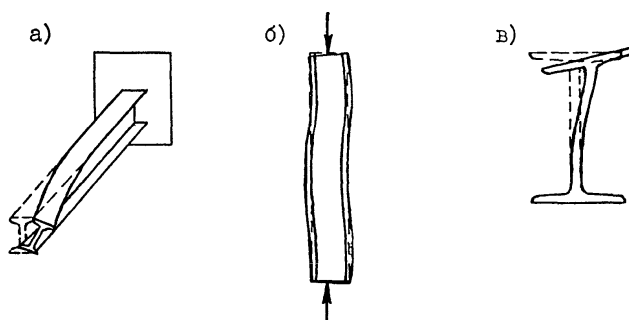
В отличие от предыдущей классификации, И.А. Мизюмский рассматривал аварии и крушения именно металлических конструкций, и по

характеру и причинам возникновения он выделяет четыре группы крушений, которые спровоцированы следующими дефектами [22]:

- дефекты из-за ошибок проектирования;
- дефекты, которые появились в процессе производства работ;
- дефекты, появившиеся в процессе эксплуатации сооружения;
- дефекты, которые появились из-за плохо изученных условий работы и свойств материалов.

Рассмотрим более подробно, каким повреждениям, в зависимости от вызывающих их воздействий, могут подвергаться стальные конструкции в процессе их эксплуатации:

1) в результате силовых воздействий: потеря устойчивости, трещины, разрывы (рисунок 2).



а - общая потеря устойчивости балки; б - общая потеря устойчивости стойки; в - потеря местной устойчивости балки

Рисунок 2 – Повреждения стальных конструкций от силовых воздействий

«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» [32];

2) в результате механических воздействий: искривления, погибы, вмятины, истирание. «Возникают в результате неправильной транспортировки и монтажа конструкций, неправильной транспортировки различных грузов как мостовыми кранами, так и внутриплощадочным железнодорожным и автомобильным транспортом, подвески к конструкциям тяжелых деталей при ремонте оборудования, нарушений правил технической эксплуатации здания» [32];

3) в результате 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» [32];

4) в результате коррозионного воздействия: «Коррозия (лат. *corrosio* - разъедание) металлов определяется как процесс (или результат) самопроизвольного разрушения металлов при их химическом, электрохимическом или биологическом взаимодействии с окружающей средой, в результате которого атомы металлов и сплавов, а также металлические изделия и конструкции из металлического состояния переходят в химические соединения» [21].

Коррозия металлов имеет сложный механизм и является гетерогенным, т.е. неоднородным процессом, это говорит о том, что коррозионное разрушение не распространяется по поверхности металла или его сплава

равномерно, а повреждает, как правило, только определенные участки поверхности, т.е. носит локальный характер. Для понимания данного процесса следует знать, что все металлы имеют зернистую структуру, границы этих зерен состоят из мелких кристаллов, а коррозия, в свою очередь, под воздействием агрессивной среды распространяется по границам этих зерен. Далее атомы металла окисляются, переходят в ионы и взаимодействуя с агрессивной внешней средой образуют продукты коррозии.

Различают два основных вида коррозии металлических строительных конструкций: химическую и электрохимическую (рисунок 3).

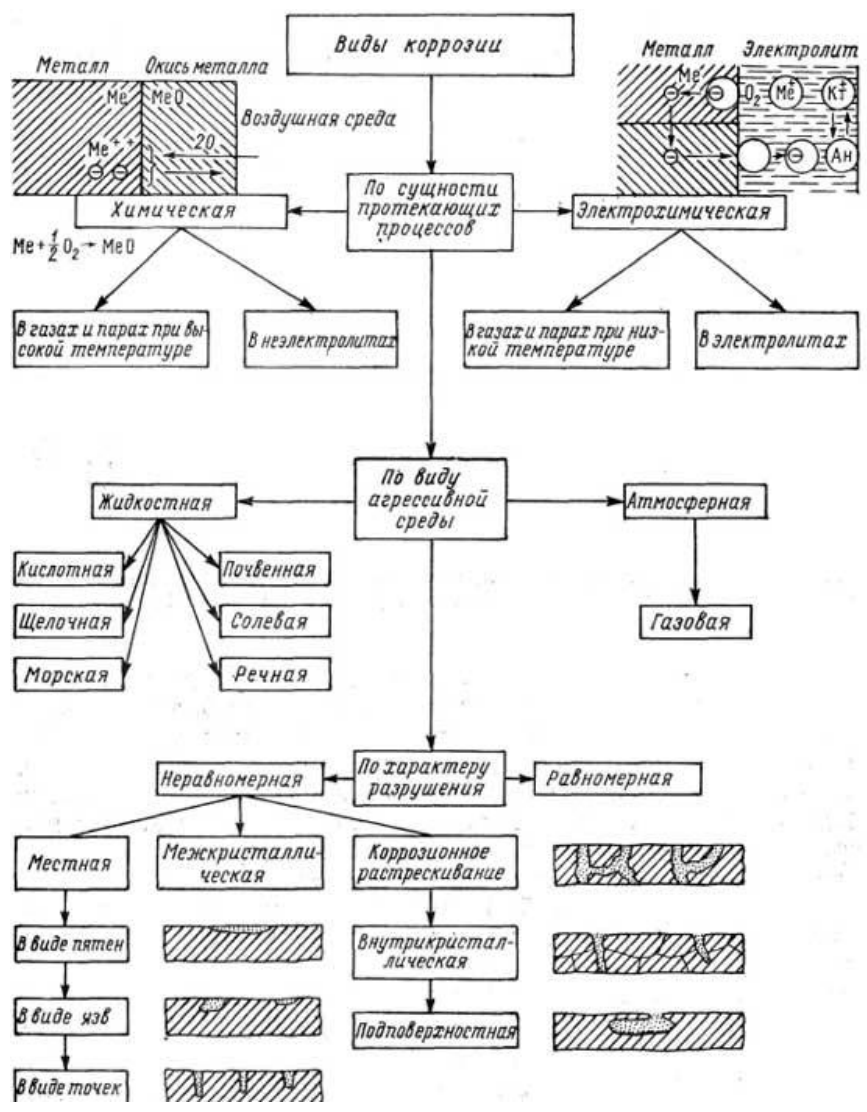


Рисунок 3 – Виды коррозии металлических конструкций

По характеру разрушения можно выделить сплошную, общую и местную коррозию.

Сплошная коррозия возникает обычно под воздействием таких факторов как кислоты, щелочи, атмосфера и охватывает всю поверхность металла. Местная коррозия же наоборот имеет локальный характер и затрагивает только отдельные участки поверхности металла. Если процесс коррозионного разрушения распространяется с одинаковой скоростью, это называется равномерной коррозией, в противном случае она называется неравномерной коррозией. Избирательная коррозия характерна для сплавов и заключается в неодинаковой скорости разрушения одного из металлов в сплаве.

«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» [42].

Обследование металлических конструкций проводится с целью проверки целостности сооружения и обнаружения различного рода дефектов.

На сегодняшний день выявить дефекты и повреждения металлических конструкций позволяет экспертиза, правила проведения которой регламентирует по ГОСТ 31937-2011 [10].

К задачам комплекса работ по обследованию можно отнести:

- определение технического состояния объекта по внешним признакам;
- выявление коррозионных повреждений и оценка степени их тяжести;
- обследование металлических соединений различного типа;
- определение качества материала, из которого выполнена конструкция.

На основании проведенных работ делается вывод о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции.

«Оценка степени конкретных повреждений производится по допускаемым отклонениям на соответствующие дефекты, регламентированные нормами» [35].

«Отличительные особенности металлических конструкций, учитываемые при усилении:

- высокая однородность материала, обуславливающая высокую степень соответствия работы элементов и узлов расчетным предпосылкам 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) различным деформациям, 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, имеющих отличные от основного металла физико-механические свойства и характеризующихся значительным разбросом эксплуатационных свойств в зависимости от качества наложения сварных швов» [13].

Согласно данным Всероссийского союза страховщиков на 01.09.2019 г. статистика по авариям/обрушениям на период с 2017 г. по 2019 г. следующая:

- 42% - низкое качество монтажа;

- 18% - некачественное изготовление конструкций и материалов;
- 18% - неудовлетворительная эксплуатация;
- 14% - совокупность причин;
- 8% - ошибки при инженерных изысканиях, проектировании, несовершенство нормативной базы.

Доля аварий на зданиях и сооружениях с металлическими конструкциями с 1981 по 2003 годы в среднем составляла 17-19 % от их общего количества. В отдельные годы (1999 г.) она достигала 33 %. В большинстве своем аварии происходят на одноэтажных зданиях производственного назначения с металлическим каркасом, разного рода зданиях модульного типа, резервуарах, водонапорных башнях.

В качестве примера можно привести аварию, которая имела место в 28 марта 2012 года в г. Саратов. На территории завода ОАО «Рефлектор» по проспекту 50 лет Октября, 101 обрушилась крыша двухэтажного производственного цеха. Общая площадь обрушения составила 900 квадратных метров (рисунок 4). Результаты строительно-технической экспертизы, проведенной ООО «Каркас»: «Вероятной причиной обрушения кровли цеха на территории бывшего завода «Рефлектор» послужил физический износ материала конструкций металлических ферм и скопление снега на кровле».



Рисунок 4 – Обрушение крыши производственного цеха

Таким образом, «надежность конструкций и сооружений зависит от многих факторов: марки материала, сечения элементов, их формы, качества изготовления и монтажа, условия эксплуатации, своевременного ремонта, в необходимых случаях – усиления конструкций и т. п. Все эти факторы влияют на срок нормальной эксплуатации и определяют несущую способность сооружения и его отдельных конструктивных элементов. Каждая конкретная авария есть результат совокупности нескольких причин, сочетание нескольких неблагоприятных факторов.

Во многих случаях, главным образом при полном обрушении конструкции, бывает трудно установить основную причину аварии. Например, при осмотре обрушившихся ферм с погнутыми стержнями невольно возникает подозрение на возможную потерю устойчивости; при более же тщательном изучении характера обрушения выясняется, что эти стержни действительно потеряли устойчивость, но уже при обрушении – при

падении одних конструкций на другие. Установление в каждом конкретном случае основной причины аварии имеет первостепенное значение» [17].

Решением проблемы дефектов и повреждений стальных конструкций в зависимости от причин их появления является их усиление такими методами как: увеличение площади сечения элементов, использование дополнительных связей, изменение конструктивных схем и некоторые другие.

1.3 Особенности усиления металлических 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» [14].

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» [15]. «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» [15];

– «временным, которое осуществляется, если необходимо обеспечить в плановом порядке нормальную эксплуатацию до капитального усиления» [15]. «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, тяжи из круглого железа; присоединение элементов на болтах» [15].

– «капитальным, применяемым для решения задач при реконструкции зданий и сооружений» [2];

«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» [2];

– «перспективным, когда на конструкцию в период эксплуатации предполагаются увеличение технологических нагрузок и другие изменения условий эксплуатации» [2].

«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 для которых является полезная (временная) нагрузка» [2].

«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, которые не позволяют обеспечить требования прочности, устойчивости, хладостойкости или выносливости;
- эксплуатационным износом, включая коррозионный износ, и
- изменением условий эксплуатации» [6].

При выборе определенного способа усиления металлоконструкций следует учесть ряд «различных факторов:

- возможность выполнения работ без остановки производства или с минимальной длительностью остановки технологического процесса;
- технологические возможности изготовления и монтажа элементов усиления;
- условия опирания на балку элементов перекрытий или покрытий (по верхнему или нижнему поясу);
- возможность увеличения строительной высоты балки и наличие пространства для размещения элементов усиления»[6].

«Основными способами усиления конструкций являются:

- увеличение площади поперечного сечения отдельных элементов конструкции;
- изменение конструктивной схемы всего каркаса или отдельных элементов его;
- регулирование напряжений.

Каждый из этих способов применяется самостоятельно или в комбинации с другим» [6].

«Усиление балок путем изменения конструктивной схемы (рисунок 5) мало зависит от места опирания плит настила, однако при усилении по схемам «а» и «б» путем превращения разрезной конструкции в неразрезную требуется возможность доступа к узлам сопряжения.

Установка дополнительных подкосов (схемы «в» и «г») возможна при наличии свободного пространства под балками.

Использование этих схем зависит также от способов усиления колонн и фундаментов.

При наличии свободного пространства под центральной частью балки эффективными могут быть схемы «д» и «е» с одно- или двустоечным шпренгелем. При использовании этих схем следует обеспечить конструктивные методы закрепления точек перегиба шпренгеля из плоскости системы.

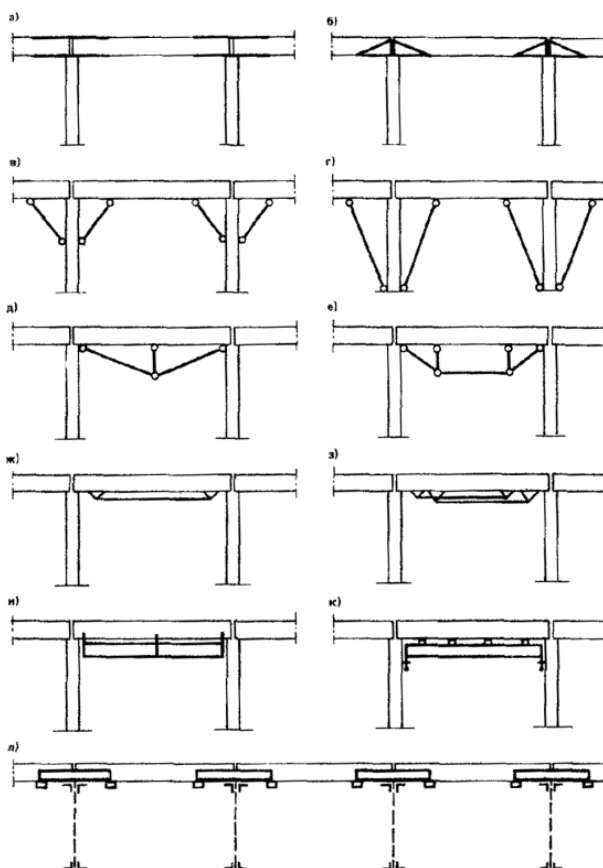


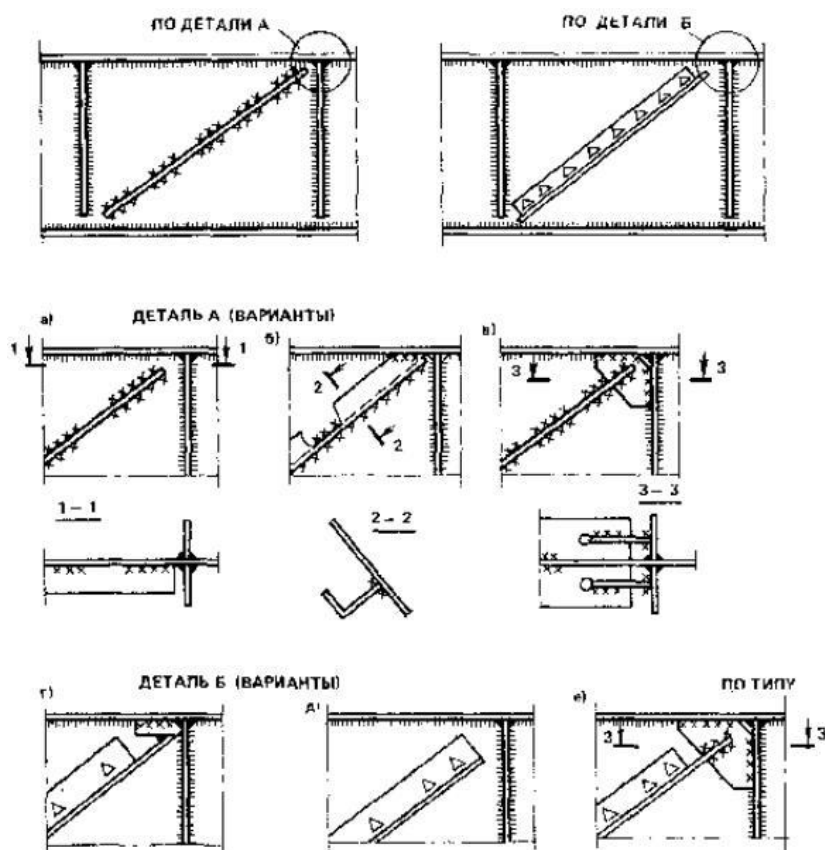
Рисунок 5 – Усиление балок путем изменения их конструктивной схемы (а-л – схемы усиления)

Рекомендуется также способы усиления балок с помощью дополнительных затяжек (схемы «ж» и «з») и подведения дополнительных балочных конструкций (схемы «и», «к») для усиления прогонов рациональна

схема «л» с подведением дополнительных опор, передающих нагрузку на параллельно устанавливаемые двухконсольные подпруги» [44].

По сути, во всех случаях усиления с изменением конструктивных схем разумно использование методов активного регулирования усилий для включения в работу новых элементов.

«Если при увеличении нагрузок не обеспечена прочность стенки по срезу или ее устойчивость, то рекомендуется установка дополнительных поперечных, продольных или наклонных ребер жесткости. Наклонные ребра жесткости (рисунок б) могут использоваться как без пригонки к поясам балки, так и с пригонкой, в первом случае они считаются не работающими на поперечную силу и служат только для обеспечения местной устойчивости, во втором - значительно снижают касательные напряжения в стенке»[22].



а-д - без пригонки к поясам; *б-г, е* - с пригонкой

Рисунок 6 – Установка наклонных ребер жесткости

«При приварке дополнительных ребер рекомендуется использовать одностороннее расположение ребер и швы минимального катета. Диагональные ребра, пригнанные к поясам, рекомендуется проектировать парными (двусторонними) из полосовой стали или уголков с креплением к полкам и вертикальным ребрам по типу схем «в» и «е» устанавливать их вдоль сжатой диагонали отсека» [22].

В общем, «усиление стальных балок в составе различных металлоконструкций выполняют при наличии следующих дефектов: общие искривления в плоскости большего или меньшего моментов инерции; скручивание; погнутости, трещины, пробоины; надрывы в стенке. При этом следует учесть, что повреждения могут быть частичными и комбинированными» [22].

«При проведении ремонтных работ (усиление) стальных балок, необходимо придерживаться следующих рекомендаций. Балки с искривлениями в плоскости большего момента инерции, при условии, что размер поврежденного участка не менее 1/100 от всего пролета, их необходимо демонтировать и выправлять. При резких искривлениях, балки необходимо разрезать в тех местах, где произошли наибольшие выгибы, выправлять, а затем стыковать.

В плоскости меньшего момента инерции при искривлении стальных балок на величину, не превышающую половину ширины полки, следует ставить дополнительные связи из тяжей и распорок» [22].

При этом следует учесть, что во всех примерах при исправлении балок и прогонов следует подготовить достаточную ширину площадки опирания на них элементов перекрытий и кровли.

«Погнутости стенок балок и прогонов рекомендуется устранять усилением поврежденных мест приваркой ребер жесткости, которые пригоняют по изогнутости стенки. Расстояние между ребрами жесткости не должно превышать половины высоты балки.

Местные вмятины, искривления, пробоины, трещины, надрывы и разрывы по всему сечению балок и прогонов, выполненных из горячекатаных, гнутых и сварных двутавров и швеллеров, рекомендуется устранять приваркой накладок.

Размеры накладки определяются по усилию, приходящемуся на поврежденную часть сечения, т.е. полку, стенку или на все сечение. Ширина накладки назначается так, чтобы выполнялось условие $P/a\delta \leq R$, где R - расчетное сопротивление стали; δ - толщина поврежденной части сечения; P - усилие в поврежденной части сечения исходя из его несущей способности.

Местные вмятины и искривления в одной из плоскостей или винтообразные искривления, если они не могут быть устранены правкой, следует вырезать, а вырезанное место заменить.

Трещины, расположенные только в части высоты стенки, рекомендуется перекрывать накладками с одной стороны стенки, а трещины по всей высоте - с обеих сторон, концы трещин засверливают.

Если поставить накладку на место повреждения невозможно, то следует перекрыть трещины несколькими отдельными ромбическими накладками, пригнанными по погнутости, и укрепить стенку ребром жесткости.

Сварные швы, имеющие трещины, рекомендуется усиливать подваркой либо рассверловкой или фрезеровкой дефектных участков с последующей проваркой швов.

Если одновременно с восстановлением предусматривается увеличение нагрузки на балку, то с целью уменьшения усилий на ее поврежденные участки рекомендуется менять конструктивную схему балки устройством шпренгеля, подкосов, затяжки, превратить балку в железобетонную с использованием стальной балки в качестве жесткой арматуры» [1].

1.4 Особенности конструкции и работы стальных балок

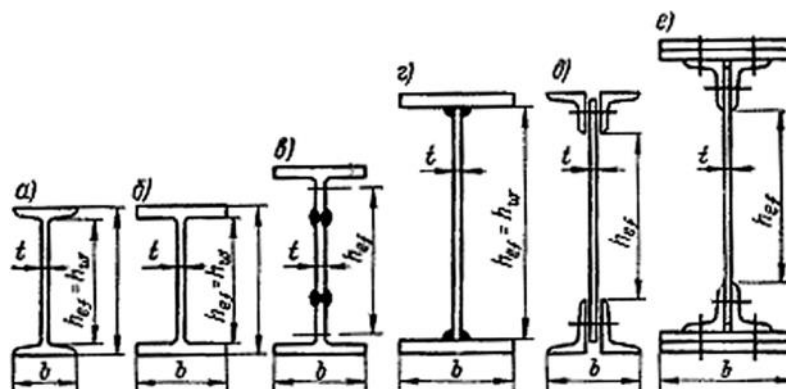
Строительство зданий и сооружений любого назначения не обходится без металлической балки – основного простейшего конструктивного элемента, который имеет минимум две опорные точки на своих концах и работает на изгиб. Металлические балки представляют собой конструктивный элемент и надежную опору быстровозводимых зданий: промышленных объектов, цехов, жилых и общественных сооружений. Также широко применяются при строительстве мостов, опор, эстакад, подвесных путей и прочее. Весьма широкое распространение балочные конструкции получили из-за простоты в изготовлении и надежности при эксплуатации.

При этом следует помнить, что в гражданском и промышленном строительстве металлические балки применяют для пролетов не превышающих 18 м, а при большей величине пролета принято монтировать фермы.

Существует три категории стальных балок, применяемых при строительстве и реконструкции современных объектов:

- тавровые: металлический профиль с поперечным сечением Т-типа;
- двутавровые: тип сортового металлопроката с Н-образным сечением;
- швеллер: металлический профиль с П-образным сечением.

Существуют различные варианты классификации стальных балок, но самый распространенный – это разделение по способу изготовления (рисунок 7): прокатные балки и составные балки (сварные, клепанные и болтовые).



а) прокатный двутавр; б) то же с параллельными гранями;
 в) сварной, составленный из двух тавров; г) сварной из листов; д,
 е) составное на высокопрочных болтах

Рисунок 7– Прокатные и составные (сварные) двутавровые балки

В современном строительстве предпочтительно применение прокатных стальных балок, так как они менее трудоемки, но при этом из-за ограниченности сортамента, их применение невозможно при больших изгибающих моментах. Прокатные двутавры выпускаются высотой до 1 м, поэтому ими можно перекрыть пролет только до 12-15 м»[7].

Выбор прокатных балок осуществляется по сортаменту ГОСТ Р 57837–2017 [12]: обыкновенный двутавр, двутавр с параллельными гранями полок (рисунок 7 а, б).

При этом, если в действующем сортаменте нет профиля, который способен воспринимать действующую нагрузку, то в таком случае прибегают к составным балкам. Сечение составных балок «обычно состоит из трех листов: вертикального – стенки и двух горизонтальных – полок (поясов), соединенных при помощи сварки (рисунок.7,е). Применяют также другие сечения, например, два прокатных тавра, соединенных с листом»[7] для получения стенки увеличенной высоты или полки из уголков и стенка из листовой стали. По способу соединения между собой основных элементов составные балки бывают сварными (самые распространенные), клепаными и на высокопрочных болтах, которые применяются при тяжелых динамических или вибрационных нагрузках.

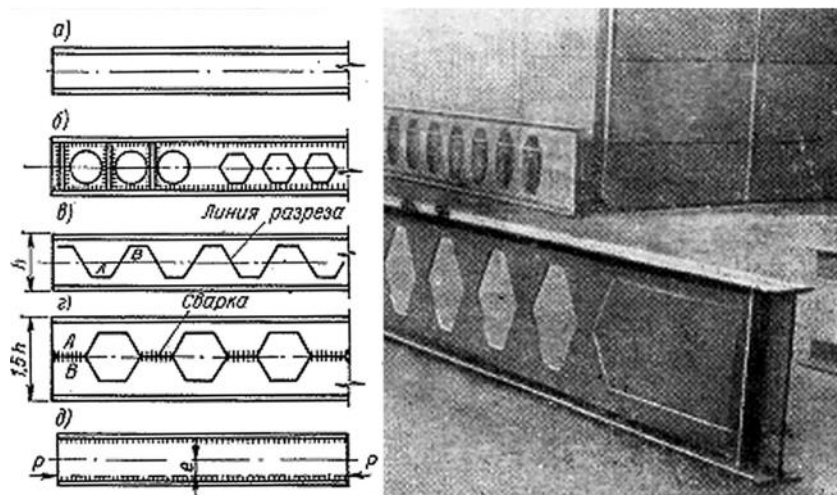
Существует также классификация стальных балок по типу стенки: сплошная, гибкая, перфорированная (волнистая), предварительно напряженная.

Балки с гибкой стенкой имеют, как преимущества, так и недостатки: у них более экономичный расход металла, но при этом для обеспечения дополнительной жесткости стенки, приходится прибегать к установке поперечных или продольных ребер жесткости. Область применения таких балок определяется особенностями этих конструкций.

Использование в современном строительстве стальных балок с перфорированной (волнистой) стенкой (рисунок.10) позволяет уменьшить толщину стенки до 2 мм и как следствие сократить расход металла до 30%, а также увеличить жесткость и несущую способность за счет увеличения сечения в 1,5 раза. К рассматриваемым балкам относятся балки, в стенках которых с целью повышения местной устойчивости созданы гофры разной формы и размера. Изготавливают такие балки несколькими способами: вырезают отверстия необходимого размера в стенке балки или разрезают стенки прокатного двутавра по ломаной линии в продольном направлении, после чего сдвигают гребни выреза, а места соединения сваривают.

Если сравнивать балки с гибкой стенкой и с гофрированной стенкой, то при примерно одинаковых характеристиках гибкости и экономии металла, рациональнее будет применение балок с перфорированной стенкой, благодаря меньшему количеству ребер жесткости, повышенной крутильной жесткости, а также большей местной устойчивости стенки. К тому же, технологически гофрирование выполнить проще, чем устройство ребер жесткости.

Достаточно широкое применение получили предварительно напряженные балки. «Эффективность предварительного напряжения стенки балки состоит в том, что в балке во время ее монтажа создаются предварительные напряжения, обратные по знаку напряжениям от нагрузки»[16].



а) сплошная; б) перфорированная отверстиями; в, г) перфорированная путем разрезания и сварки стенки прокатного двутавра; д) предварительно напряженная

Рисунок 8 –Классификация балок по типу стенки

По статической схеме балки могут быть разрезными (однопролетными) и неразрезными (многопролетными), и консольными.

«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» [41].

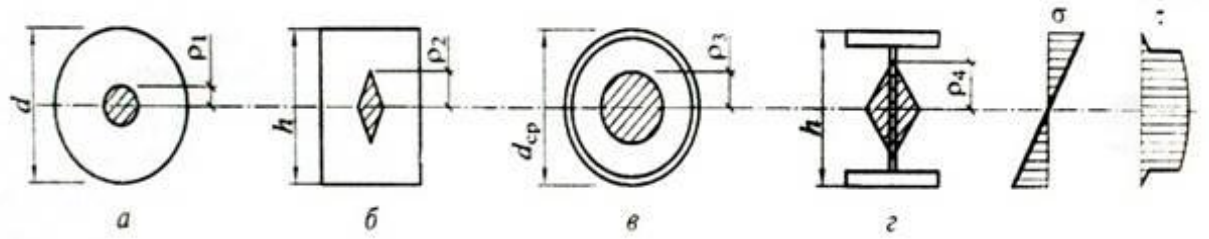
Консольная балка удерживается в равновесии только с помощью одной опоры в виде заземления. При этом, балки такого типа имеют один существенный недостаток – большие прогибы.

Кроме того существуют и другие классификации. К примеру, по напряженному состоянию балки могут быть обычными и с регулируемым напряжением, которое создается при помощи предварительно-напряженных затяжек или способом смещения опор в неразрезных балках.

По назначению принято различать стропильные, подстропильные, балки рабочих площадок, подкрановые и мостовые балки. По материалу, из которого они изготавливаются, выделяют балки стальные, бистальные, полистальные, а также из сплава алюминия.

Как уже было указано ранее, в настоящее время при строительстве и реконструкции зданий и сооружений двутавровое симметричное сечение является основным балочным профилем, характеризующимся наибольшим разнообразием по типам. Данное сечение является наиболее экономичным «по расходу металла, а преимущество сечения балки как конструкции, работающей на изгиб, можно определить как отношение момента сопротивления к площади сечения, равное ядровому расстоянию» [30].

На рисунке 11 наглядно продемонстрировано сравнение ядровых расстояний различных типов сечения: круглое, прямоугольное, трубчатое и двутавровое. Сечение двутавровое выгоднее прямоугольного в 2,5 раза и круглого в 3,4 раза, это происходит за счет наиболее рационального распределения металла, и как следствие наилучшего распределения нормальных напряжений от изгиба балки, а также касательных напряжений, что позволяет сделать стенку балки достаточно тонкой.



Сравнение типов сечений балок:

a — круглое, $\rho_1 = 0,125d$; b — прямоугольное, $\rho_2 = 0,17h$; v — трубчатое, $\rho_3 = 0,25d_{cp}$; z — двутавровое, $\rho_4 = 0,42h$

Рисунок 9 – Сравнение типов сечений балок

Первый российский сортament металлопроката был разработан в 1900г. (до этого применяли немецкий сортament). В этом стандарте был предусмотрен всего один тип двутаврового профиля, который в силу особенностей своей геометрии мог эффективно использоваться только в качестве элементов, работающих на изгиб (балок).

С момента появления первого отечественного сортамента прошло сто с небольшим лет. За это время инженерная наука, как и металлургическая промышленность, прошли огромный путь, в процессе которого произошел пересмотр не только принципов формообразования металлических конструкций, но и способов их изготовления и технологий монтажа.

Интенсивное развитие промышленности (всех отраслей), появление новых высокопрочных сталей и способов сварки, развитие нормативно-технической базы, разработка и внедрение новых методов расчета конструкций, – все эти факторы способствовали повышению металлоемкости строительной отрасли в целом, что вызвало необходимость совершенствования старых и разработки новых эффективных конструкционных форм стальных профилей.

В результате масштабной рационализации (улучшения) российского сортамента сфера применения стального двутаврового проката (в период с 1960 г.) заметно расширилась за счет внедрения в отрасль новых

эффективных типов двутавровых профилей с параллельными гранями полок. Сегодня симметричный двутавровый профиль без преувеличения можно назвать самым востребованным в строительстве типом металлопроката.

«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» [20].

Любые металлические двутавры изготавливаются в строгом соответствии с требованиями ГОСТ и ТУ, поэтому они имеют регламентированную форму и состав. Благодаря этому, имея нужную документацию, можно легко рассчитать необходимые размеры и параметры двутавров, необходимых для конкретной конструкции.

Двутавр маркируется цифро-буквенным обозначением, где цифра обозначает высоту сечения (h), а буквой обозначается тип двутавра. Кроме того обычно указывается материал изделия и стандарт, где описаны химические и механические показатели стали.

Рассмотрим расшифровку буквенного обозначения двутавра с параллельными полками, которые по соотношению размеров и условиям работы по ГОСТ Р 57837–2017 [12] делятся на типы:

- балочные: Б-нормальные и Ш-широкополочные (применяются в конструкциях, делающих упор на растяжение, либо упор на сжатие, либо же сжатие с изгибом);
- К-колонные (характеризуются практически равной высотой профиля и шириной полки и применяются в конструкциях, с упором на изгиб);
- С-свайные (применяются в конструкциях, с упором на изгиб)

- ДБ, ДК - дополнительные серии.

Второй способ разделения – по видам длины (на профили длиной от 4 до 12 м):

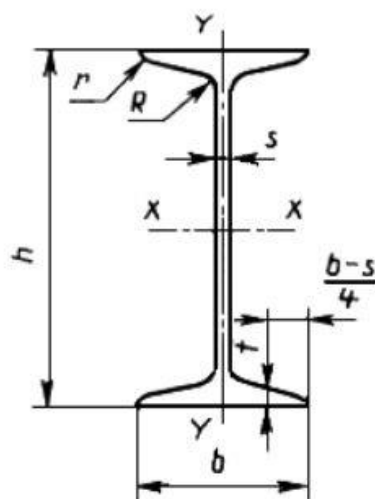
- МД - мерной длины;
- МД1 - мерной с немерной длиной;
- НД - немерной;
- ОД - ограниченной в пределах немерной.

По согласованию изготовителя с потребителем допускается изготовление двутавров длиной свыше 12 м.

По состоянию поставки выделяют:

- ГК - горячекатаные;
- КП - после контролируемой прокатки, в том числе с ускоренным охлаждением.

Согласно поГОСТ 8239-89[11] поперечное сечение двутавров должно соответствовать указанному на рисунке 10.



h – высота двутавра; b – ширина полки; s – толщина стенки;
 t – средняя толщина полки; R – радиус внутреннего закругления; r – радиус закругления полки

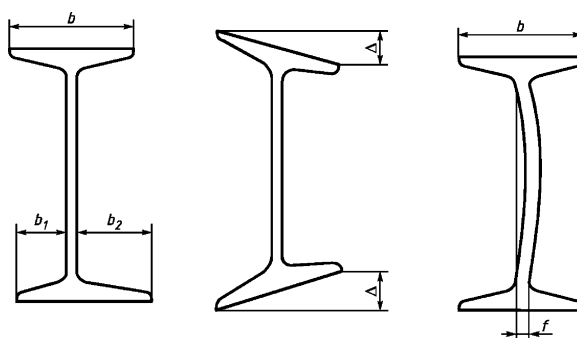
Рисунок 10 – Поперечное сечение двутавра:

Металлический двутавр с уклоном внутренних граней полок 6-12% согласно поГОСТ 8239-89[11] применяется главным образом в качестве элемента, работающего на изгиб, а также в составных сечениях колонн. Работа в качестве сжатых элементов (стоек, колонн) не эффективна ввиду малого момента инерции.

Двутавры «Б» выпускаются высотой до 1000 мм, с шириной полок до 320 мм. Двутавры «Ш» имеют высоту также до 1000 мм при максимальной ширине полок 400 мм. Двутавры «К», использование которых эффективно в колоннах зданий, имеют соотношение высоты к ширине полок 1:1 и максимальные размеры 400х400 мм.

Номинальные размеры двутавров стальных горячекатаных с параллельными гранями полок, площадь поперечного сечения, масса 1 м длины, справочные величины для осей приведены таблице 2 поГОСТ 8239-89[11].

Предельные отклонения по размерам и форме поперечного сечения двутавров (рисунок 11-12) должны соответствовать приведенным в таблице 2 ГОСТ 8239-89[11].



b_1 – ширина укороченного фланца; b_2 – ширина удлиненного фланца; Δ – перекося полки;
 f – прогиб стенки

Рисунок 11– Предельные отклонения по размерам и форме поперечного сечения двутавров

Параметр двутавра, показатель качества	Размер	Предельное отклонение при точности прокатки	
		повышенной	обычной
Высота h	До 140 включ. Св. 140 » 180 »	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$ $\pm 2,5$
	Св. 180 до 300 включ. » 300 » 360 »	$\pm 3,0$	$\pm 3,0$ $\pm 3,5$
	Св. 360 до 600 включ.	$\pm 4,0$	$\pm 4,0$
Ширина полки b	До 73 включ. Св. 73 » 90 » » 90 » 135 »	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$ $\pm 2,5$ $\pm 3,0$
	Св. 135 до 155 включ. » 155	$\pm 3,0$	$\pm 3,5$ $\pm 4,0$
Толщина полки t^*	До 7,5 включ. Св. 7,5 » 8,9 » » 8,9 » 10,7	-0,4 -0,5 -0,6	-0,7 -0,7 -0,8
	Св. 10,7 до 12,3 включ. » 12,3 » 14,2 » » 14,2 » 15,2 »	-0,7 -0,8 -0,9	-1,0
	Св. 15,2	-1,0	-1,2
Перекося полки Δ при ширине b	От 55 до 190 включ.	Не более 0,0125 b	Не более 0,02 b
Отклонение от сим- метричности δ $\delta = \frac{b_1 - b_2}{2}$ при ширине b	До 73 включ. Св. 73 » 90 » » 90 » 135 »	2,0	2,0 2,5 3,0
	Св. 135 до 145 включ. » 145	3,0	3,5 4,0
Длина	До 8 м включ. Св. 8 м	+40 К допуску +40 прибав- лять по 5 мм на каждый метр длины св. 8 м	+40 +80

Рисунок 12- Предельные отклонения по размерам поперечного сечения прокатного двутавра

Прогиб стенки (f) не должен превышать 0,15 S .

Кривизна двутавра не должна превышать 0,2% длины

Притупление наружных кромок полок двутавров повышенной точности не должно превышать 2,2 мм, для двутавров обычной точности - не контролируется.

Отклонения по массе 1 м двутавра не должны превышать плюс 3, минус 5%.

Размеры и геометрическую форму контролируют на расстоянии не менее 500 мм от торца двутавра.

Высоту двутавра контролируют в плоскости $Y-Y$.

Далее рассмотрим более подробно процесс изготовления прокатных и составных (сварных) балок. Производство металлических балок не только в крупных промышленных масштабах, но и по индивидуальным заказам.

Как описано выше, балки могут изготавливаться прокатным или составным способом. Однако, двутавровая балка, изготовленная составным (сварным) способом имеет ряд преимуществ над прокатной.

С помощью составного метода можно изготовить балки практически любого размера, тогда как размер прокатных балок ограничен возможностями стана. Также есть возможность изготовить балку, у которой в одном и другом участке будет отличаться ширина полки. Чтобы сделать такую балку на прокатном стане нужно дорогостоящее оборудование.

Производство сварных балок – это сложный и ответственный процесс. При котором нужно рассчитать и учесть множество факторов, таких как - прочность, жесткость и в особенности плотность, величина которой должна быть очень высокой. К примеру, из-за нарушения технологических или иных требований в процессе сварки стального листового металла могут появиться такие дефекты как: трещины; полости, поры; твердые включения; несплавления и непровары; нарушение формы шва и иные дефекты. Изделия с такими дефектами считаются браком - их нельзя использовать в производстве, так как они не способны выдержать больших нагрузок на изгиб и кручение.

Технологический процесс изготовления сварной балки двутаврового сечения включает следующие этапы (рисунок 13):

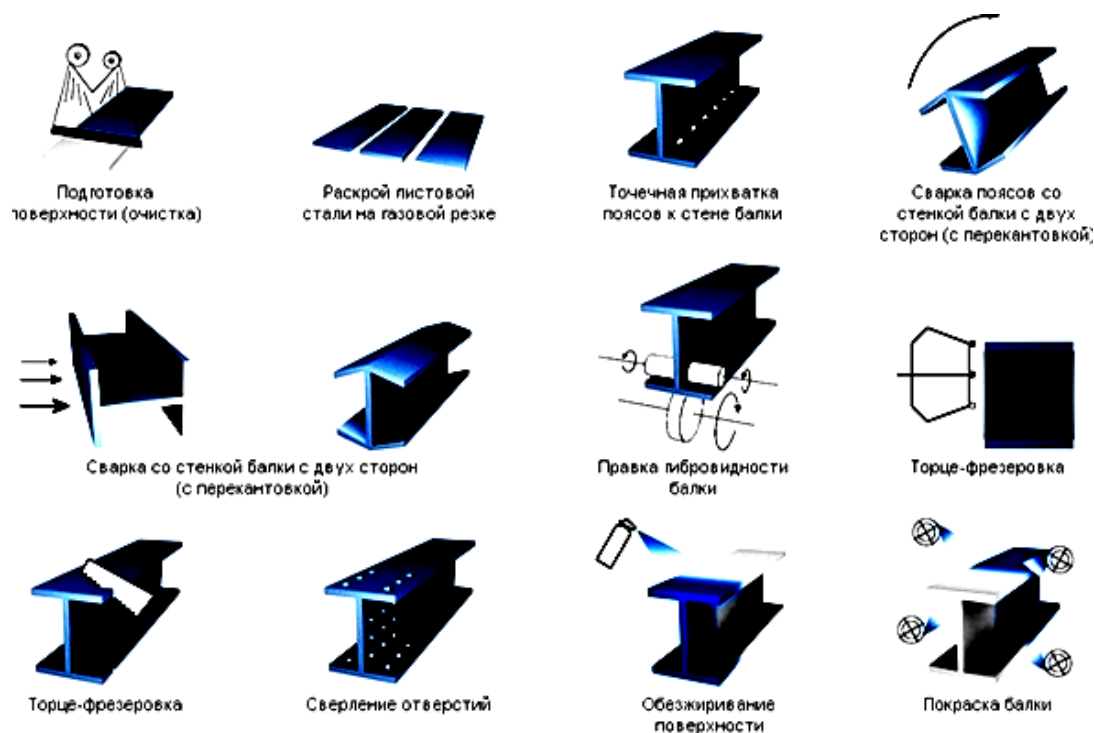


Рисунок 13 - Этапы изготовления сварной двутавровой балки

Прежде всего, необходимо рассчитать необходимые параметры жесткости и прочности и по результатам выбрать марку стали.

Далее необходимо подготовить поверхность к сварочным работам, т.е. произвести очистку поверхности, удалить следы коррозии, оксидные пленки и прочее.

Затем согласно чертежу производится раскрой листового проката на полосы, после чего с помощью торцефрезерного станка с целью улучшения провара шва между полкой и стенкой двутавра проводится фрезеровка торцов.

Далее выполняется сборка, которая должна быть достаточно точной, так как необходимо обеспечить строгую симметричность расположения полок между собой и перпендикулярность полок и стенки. Сборка ручным способом на стеллаже очень трудоёмка и применяется только в небольших объемах в мелких производственных предприятиях. При массовом

производстве сборку выполняют с помощью специальных автоматизированных станков.

Далее следует сварка элементов балки. Приёмы и последовательность наложения сварных швов могут быть различными.

Сварка наклонным электродом позволяет одновременно сваривать два шва (две поверхности балки), однако глубина шва в этом случае неглубокая. При выполнении шва «в лодочку» (на стапелях под углом 45°) обеспечиваются лучшие условия формирования шва и глубины проплавления стенки, но данный способ, тем не менее, характеризуется своей малой производительностью, так как после каждого шва приходится переворачивать изделие[31].

Кроме того, после сварки балку очищают от брызг и наплывов металла, после чего производится дробейструйная очистка конструкции. В заводских условиях это дробейструйная установка, разновидность оборудования, предназначенного для очистки металлоконструкций перед проведением окрасочных работ. Далее обезжиривание и покраска при необходимости по ГОСТ 2789-73[9].

Завершающим этапом изготовления сварной двутавровой балки является финишная правка и выходной контроль качества. Правка балки осуществляется с помощью прокатного станка со множеством роликов, где устраняются небольшие перекосы, возникшие во время сборки и сварки профиля.

Для сварки балок промышленным способом применяются специальные сварочные линии. Небольшие индивидуальные заказы возможно осуществлять ручным способом с применением электродуговой или аргоновой сварки в зависимости от марки металла, его способности свариваться. Но такой способ несет за собой удорожание конечного продукта.

Сварочные работы используют не только для скрепления полок и стенки, но также и для того, чтобы соединить встык готовые балки. С этой целью широко применяется следующее оборудование:

- консольные и порталные установки входят в состав линий по производству балок и предназначены для автоматизированной сварки под слоем флюса или в среде защитных газов протяженных прямых швов с одновременным контролем качества сварного шва. В данном оборудовании можно выполнять соединения под углом 45° , что обеспечивает хороший катет и качество сварки в общем;

- сварочные манипуляторы: представляют собой современное автоматизированное оборудование, существенно упрощающее выполнение соединения различных металлических элементов. Главное преимущество подобного манипулятора - универсальность и легкость переналадки. Служит для автоматической сварки в среде защитных газов под флюсом;

- самоходные сварочные тракторы (сварочная каретка): это особый вид самодвижущегося оборудования, которое применяется для непрерывного и точного движения одной или нескольких сварочных горелок по заданной траектории в процессе выполнения сварочного шва, также упрощает проведение больших объемов работ при высоком качестве сварных соединений.

Проектирование металлических конструкций представляет собой сложный многоэтапный процесс, где выполняется расчет всех важных элементов конструкции, их конструктивная форма, взаиморасположение, количество и вид материала.

Цель расчёта металлоконструкций при проектировании – создание конструктивных решений с обеспечением оптимальной прочности, трудозатрат, качества и количества материалов.

При расчетах металлоконструкций на прочность, жесткость и устойчивость необходимо не только выбрать расчетную схему, максимально точно соответствующую реальным условиям, но и использовать такие

значения сопротивления материала, при котором действительное напряженно-деформированное состояние рассматриваемой системы никогда не достигнет опасного предела.

Достигнуть этого можно различными методами, но одним из самых применяемых и эффективных является метод предельных состояний, который впервые был разработан в Советском Союзе в 50-е годы.

«Под предельными состояниями подразумевают такие состояния, при достижении которых конструкции или соединения не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним в процессе эксплуатации или возведения. Предельные состояния разделяются на две группы:

- по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации (ввиду потери устойчивости, прочности[45]; вязкого, хрупкого, усталостного или иного характера разрушений; резонансных явлений; возникновения текучести материала, ползучести или чрезмерного раскрытия трещин);

- по непригодности к нормальной эксплуатации, вследствие появления недопустимых перемещений (прогибов, осадок, углов поворота), колебаний, трещин и т.д.

Расчет строительных конструкций состоит в определении в них усилий до действующих нагрузок и назначении необходимых размеров поперечных сечений элементов, соединительных деталей и стыковых соединений, которые обеспечивают удовлетворение расчетным условиям указанных двух групп предельных состояний» [23].

Таким образом, сущность данного метода заключается в том, чтобы не допустить наступления предельных состояний при эксплуатации строительных конструкций.

«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» [25].

В зависимости от назначения конструкции, условий эксплуатации, расчет балок (изгибаемых элементов) можно производить как «без учета, так и с учетом пластических деформаций. При этом элементы конструкций согласно СП 16.13330.2017» [36] в зависимости от напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетного сечения подразделяются на три класса:

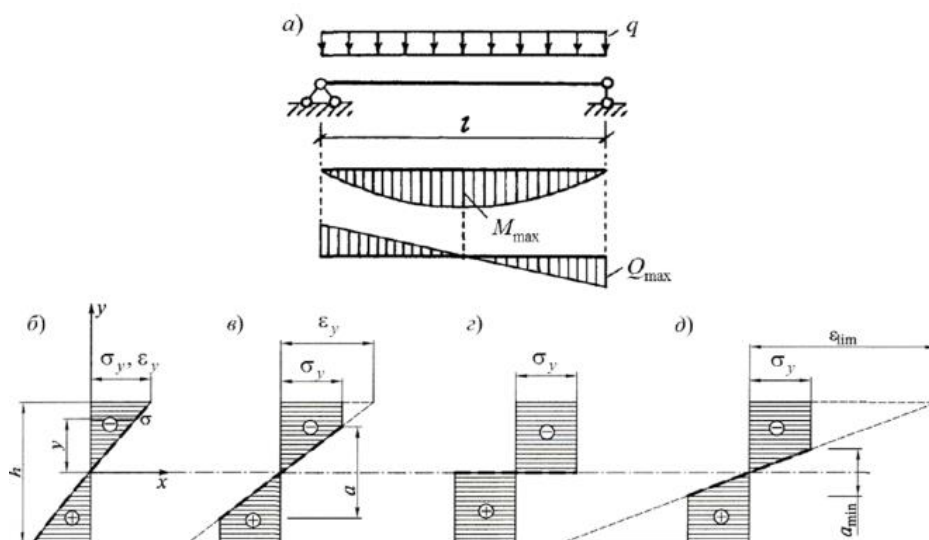
1-й класс - НДС, при котором напряжения по всей площади сечения не превышают расчетного сопротивления стали $\sigma \leq R_y$ (упругое состояние сечения);

2-й класс - НДС, при котором в одной части сечения $\sigma < R_y$, а в другой $\sigma = R_y$ (упруго-пластическое состояние сечения);

3-й класс - НДС, при котором по всей площади сечения $\sigma = R_y$ (пластическое состояние сечения, условный пластический шарнир).

Рассмотрим работу изгибаемого элемента. Расчетные усилия в сечении балки – это изгибающий момент M_{\max} и поперечная сила Q_{\max} (рисунок 14, а).

По мере роста нагрузки в сечении изгибаемого элемента могут развиваться пластические деформации. Развитие пластических деформаций в сечении изгибаемого элемента иллюстрируется эпюрами на рисунке 14 б-д.



а – расчетная схема элемента, эпюры усилий: б – напряженно-деформированное состояние сечения в упругой стадии; в – в упругопластической; г – в пластической; д – при ограничении пластичности

Рисунок 14 - Работа стального элемента при плоском изгибе

«В изгибаемых элементах (рисунок 14, а) в упругой стадии полностью нагруженными в предельном состоянии оказываются лишь крайние волокна ($\sigma = \sigma_y$), а средние недогружены ($\sigma < \sigma_y$) (рисунок 14, б). Появление текучести материала в фибровых зонах элемента ($\epsilon > \epsilon_y$) не приводит к исчерпанию несущей способности элемента, так как рост напряжений ограничен пределом текучести ($\sigma = R_y$), а в глубине сечения, где только упругие деформации ($\epsilon < \epsilon_y$), напряжения остаются пропорциональны деформациям и меньше предела текучести σ_y (рисунок 14, в). Часть сечения, где деформации и соответственно напряжения не превышают предельных значений, образует упругое ядро высотой a , в котором отсутствует текучесть, и, следовательно, прогиб балки имеет конечное значение. Эта стадия работы балки называется упруго пластической.

По мере возрастания момента деформации увеличиваются ($\epsilon > \epsilon_y$), упругое ядро, где напряжения меньше предела текучести ($\sigma < \sigma_y$), уменьшается. Полное исчерпание несущей способности элемента наступит при $a = 0$, т.е. когда происходит пластификация всего сечения, при котором

по всей высоте сечения напряжения равны пределу текучести ($\sigma = \sigma_y$). В рассматриваемом нами двутавровом сечении образуется условный пластический шарнир (рисунок 14, г)» [33].

«При образовании шарнира пластичности все фибры сечения находятся в стадии текучести и, следовательно, их длина может изменяться при постоянном напряжении, вследствие чего изгибаемый элемент может поворачиваться, как вокруг оси шарнира.

Работа шарнира пластичности возможна только в направлении действия предельного момента. При действии изгибающего момента в обратном направлении напряжения уменьшаются, материал снова становится упругим и шарнир пластичности замыкается. В отличие от обычного шарнира в пластическом шарнире момент не равен нулю»[33].

Далее опишем *преимущества и недостатки двутаврового проката*, которые необходимо учитывать на стадии проектирования металлоконструкций.

Среди преимуществ, прежде всего, нужно отметить надежность и повышенные прочностные характеристики, что обусловлено прочностью стали как строительного материала, а также специфической формой сечения, созданной для равномерного распределения воздействующих на нее вертикальных сил по всей поверхности, что значительно повышает срок эксплуатации металлоконструкции.

Благодаря особой геометрической форме, двутавры имеют значительно меньший вес в сравнении с другими типами металлопроката с аналогичными прочностными характеристикам.

Кроме того, еще одним важным преимуществом является значительная экономичность. Ввиду своей жесткости, применение в строительстве балки двутаврового сечения позволяют избежать использования дополнительных армирующих элементов для дополнительной устойчивости всей конструкции к разрушениям.

Также двутавры обладают устойчивостью к сжатию и нагрузкам на изгиб. Благодаря чему балка двутаврового сечения может частью конструкций, которые подвергаются большой вибрации, например при строительстве мостов.

Конструкции из двутавров легко поддаются сварке, тем самым повышается скорость строительно-монтажных работ, что позволяет добиться существенного сокращения сроков сдачи готового объекта.

Еще одним важным достоинством считается постоянство геометрических форм и характеристик. Жесткость двутавра обусловлена его геометрической формой, благодаря чему он не подвергается существенной деформации даже при воздействии больших сил.

Двутавровые прокаты легко транспортировать: его специфическая форма «Н» способствует компактной укладке в транспортном средстве.

При таком широком списке достоинств, двутавровые балки имеют и ряд недостатков.

Во-первых они обладают достаточно слабой огнестойкостью: сталь представляет собой негорючий материал, но, как и все материалы, которые используются в строительстве, не может в течение относительно длительного времени выдержать воздействие высокой температуры, которая возникает при пожаре внутри здания. В среднем фактический предел огнестойкости стальных конструкций составляет всего 15 минут. Это можно объяснить достаточно быстрым снижением во время пожара деформационных и прочностных характеристик металла в условиях повышенных температур.

Кроме того двутавры обладают слабой устойчивостью к коррозии. Поэтому все двутавры в зависимости от их назначения и условий эксплуатации необходимо обрабатывать специальными защитными средствами.

Двутавровые балки нельзя применять при слишком больших пролетах. В таком случае придется прибегать к монтажу специальных опор, иначе основные несущие способности балки сильно снизятся.

Более того, балки двутаврового сечения обладают низкой устойчивостью к скручиванию: к примеру, при одинаковой площади сечения устойчивость балки к скручиванию в 400 раз ниже, чем у круглой трубы. Это также необходимо учитывать при выборе металлопроката для строительства.

1.5 Усиление стальных балок методом увеличения сечения

Балочные конструкции являются опорой здания, поэтому их состоянию следует уделять особое внимание, так как их износ может привести к разрушению всей конструкции. При проведении работ по усилению и ремонту таких элементов наибольшего эффекта можно добиться просто демонтировав поврежденные конструкции и заменив на новые. Но бывают ситуации, когда это невозможно сделать по ряду причин или просто экономически не выгодно, тогда прибегают к установке дополнительных металлических конструкций, что достаточно широко применяется при усилении строительных ферм, мостов, кранов, строительных ферм, фундаментов, балок, ригелей.

Усиление металлических балок бывает местным и общим. Местное усиление выполняют при помощи установки металлических накладок и ребер, а общее усиление достигается с помощью затяжек, шпренгелей или при помощи изменения опорного сопряжения.

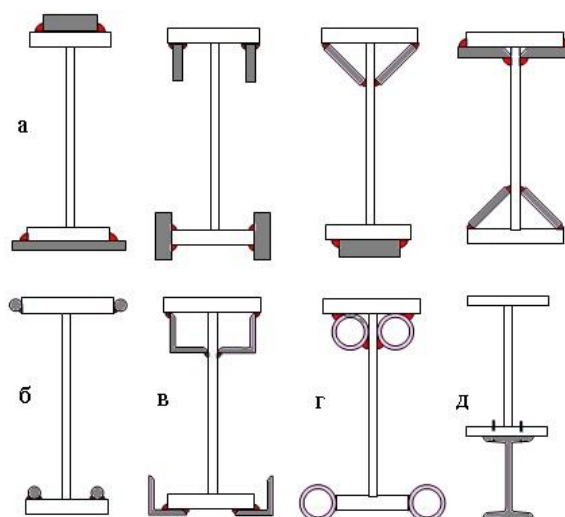
В общем, повышения несущей способности изгибаемых элементов можно добиться с помощью симметрично расположенных элементов усиления или создав симметрию относительно нейтральной оси. При этом необходимо обеспечить надежную совместную работу нового сечения с балкой, а вся конструкция должна быть защищена от влияния внешних факторов, таких как коррозия или возникновение мостиков холода.

«При разработке проектов усиления изгибаемых элементов следует учитывать следующие требования:

- предусматривать максимальную разгрузку балок перед усилением от временной нагрузки и части постоянных нагрузок;
- ограничивать объем работ по усилению участками, в которых усиление требуется по расчету;
- предусматривать такое усиление, при котором минимальные сечения дополнительных деталей позволяет максимально увеличить геометрические характеристики усиливаемых сечений, т.е. принимать расположение усиливающих деталей на возможно большем расстоянии от нейтральной оси;
- предусматривать минимальный объем сварки в потолочном положении;
- производить усиление в следующей последовательности: нижний пояс, стенка, верхний пояс – во избежание сварочных деформаций, увеличивающих прогиб (седловидность балки) до недопустимых величин» [34].

Весьма эффективным и перспективным усилением балочных систем является такой широко распространенный на практике метод под названием - метод увеличения сечения.

Сущность данного метода заключается в увеличении сечения металлических конструкций на участках наибольших напряжений путём присоединения к данной конструкции дополнительных усиливающих элементов (пластин, уголков, стержней, швеллеров и двутавров) на сварке, болтах или заклепках (рисунок 15), при этом необходимо предусмотреть разгрузку конструкции на 60% или более или установить временные дополнительные опоры. Сварные, болтовые или заклепочные соединения необходимо располагать в тех местах, где будет удобно их выполнять и впоследствии инспектировать.



а – пластин; б – стержней; в – уголков; г – труб; д – двутавров

Рисунок 15 – Усиление металлических балок методом увеличения поперечного сечения

«Способом увеличения сечений рекомендуется выполнять усиление несущих конструкций и отдельных их элементов, имеющих дефекты, повреждения или обладающих недостаточной прочностью, устойчивостью и жесткостью, при условии технико-экономической нецелесообразности иных способов усиления» [24].

«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.

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.

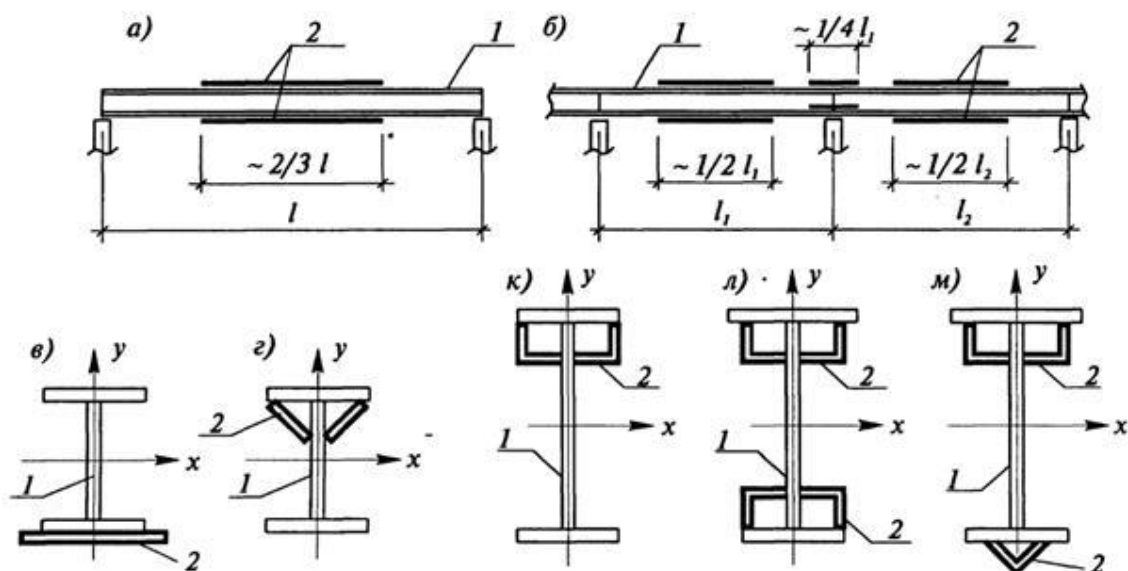
При усилении конструкций способом увеличения сечений рекомендуется использовать металл в виде листового, сортового и фасонного проката.

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» [37].

«При усилении изгибаемых элементов наиболее рациональным по расходу стали являются схемы, представленные на рисунке 16, 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» [19]:

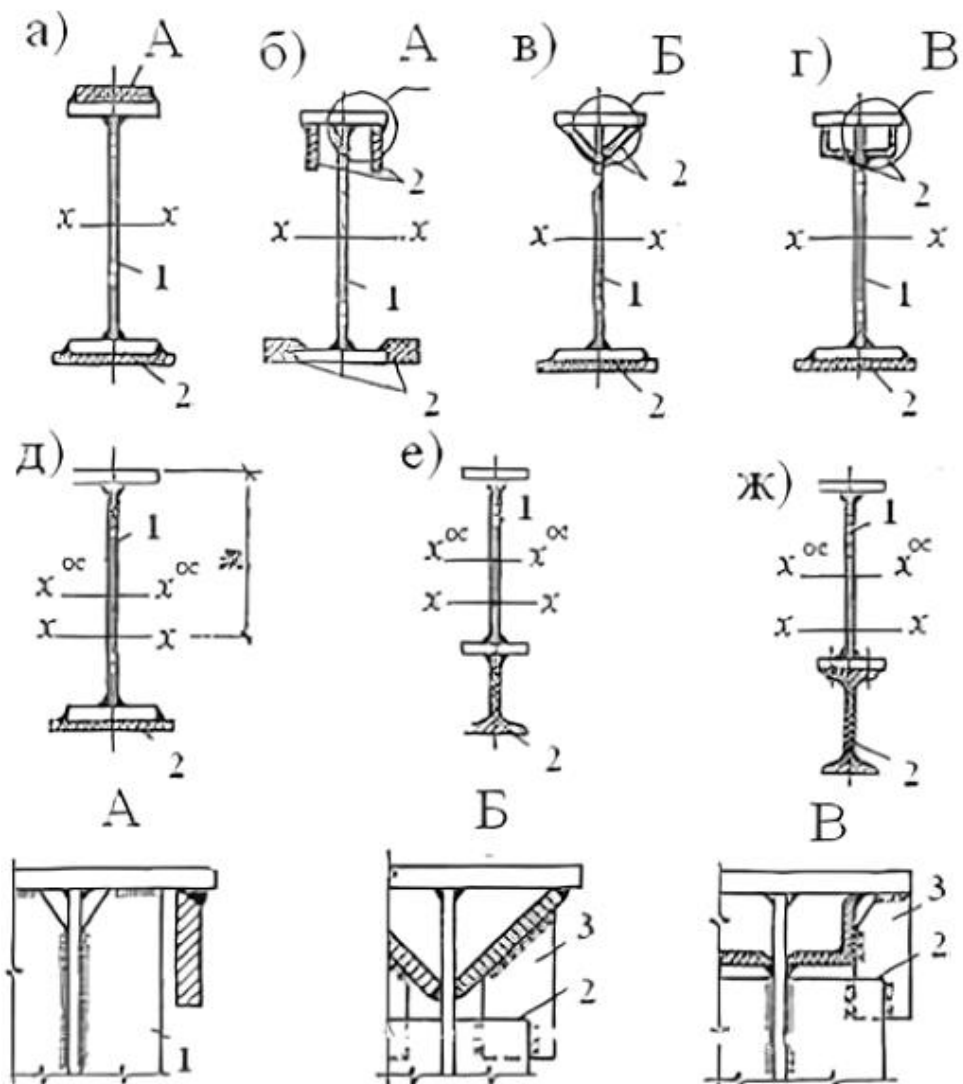
- для однопролетной схемы - середина пролета $2/3 l$;
- для неразрезной многопролетной - середина пролета $1/2 l$ и опорные участки $1/4 l$



1 -усиливаемый изгибаемый элемент; 2 - дополнительные усиливающие элементы.

Рисунок 16 - Усиление изгибаемых элементов путем увеличения сечения

Усиление с помощью симметричных накладок, несмотря на большой объем потолочной сварки, является тем не менее наиболее простым способом усиления. При этом, потолочных швов можно избежать при большей величине накладки, но важно помнить, что в данном случае может возникнуть значительная концентрация напряжений по кромкам балки.



а-г - схемы двустороннего усиления; д-ж - схемы одностороннего усиления; 1- существующее ребро жесткости; 2- линия обреза ребра; 3- надставка ребра

Рисунок 17 - Схемы усиления изгибаемых элементов методом увеличения сечения

При усилении методом увеличения сечения наиболее рациональными с точки зрения расхода стали, а также не приводящие к значительному смещению центра тяжести, являются двусторонние симметричные или близкие к симметричным схемы усиления (рисунок 17, а).

«В случаях, когда усиление верхнего пояса по схеме (рисунок 17, а) связано с необходимостью частичного или полного демонтажа настила, возможно выполнить усиление по типу схем (рисунок 17, б-г). Недостатком схем (рисунок 17, б-г) является большой объем сварочных работ, связанных с наложением потолочных швов, и значительное ослабление сечений при сварке под нагрузкой. Кроме того, эти схемы связаны с трудоемкими операциями по обрезке и надставке ребер жесткости (рисунок 17, в, г; детали Б и В).

К несимметричному одностороннему усилению прибегают в тех случаях, когда двустороннее усиление экономически и технически нецелесообразно. Несимметричное одностороннее усиление обычно осуществляют с помощью швеллеров, тавров и двутавров по типу схем (рисунок 17, е-ж). Существенный недостаток данного способа заключается в сложности монтажа при помощи потолочных швов или высокопрочных болтов. Более того элементы усиления нужно предварительно выгибать под форму изгиба балок, подвергающихся усилению под нагрузкой, что можно выполнить только при помощи мощных домкратов или иных натяжных устройств» [18].

Каждый этап усиления стальных балок необходимо подвергать тщательному контролю качества.

Мероприятия, связанные с усилением металлических балок, следует проводить при отсутствии временных нагрузок и при температуре окружающей среды не ниже $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обычной стали и не ниже $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для сплавов кипящей плавки. Если швы необходимо усилить наплавкой, показатели напряжения в материале не должны превышать 0,8 расчетного сопротивления металла, а поверхности элементов усиления и усиливаемой

балки необходимо обработать согласно третьему классу шероховатости по ГОСТ 2789-73 [9]. Сварочные работы необходимо проводить на предварительно подготовленных поверхностях – тщательно просушенных, очищенных от механических загрязнений, и химических пленок. Сварочные кромки необходимо обработать до металлического блеска.

«Рабочие чертежи конструкций, изготавливаемых заново, а также узлов и участков ремонтируемых конструкций, должны содержать схемы расположения усиливаемых и новых элементов по видам конструкций (прогоны, балки, фермы и т.д.), рабочие чертежи элементов и узлов, спецификацию стали, а также необходимые требования по технологической последовательности выполнения работ по усилению конструкции, влияющей на эффективность применяемого решения» [26].

Усиление конструкций под нагрузкой с помощью сварки возможно в том случае, если в элементах групп конструкций 1, 2, 3 и 4 группы предельный уровень начальных напряжений σ_{max} будет:

- для первой группы $\sigma_{max} \leq 0.2R_y$
- для второй группы $\sigma_{max} \leq 0.4R_y$
- для третьей группы $\sigma_{max} \leq 0.6R_y$
- для четвертой группы $\sigma_{max} \leq 0.8R_y$

Где R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести.

Стоит отметить, что, в общем, прочность конструкции напрямую зависит также и от качества сварки и сварных соединений, в том числе и от режима сварки, толщины и ширины элемента, а также от направления сварных швов, поэтому процессу сварки и качеству сварных соединений при усилении металлоконструкций следует уделять особое внимание.

Обратимся к определению термина «Сварка» - согласно ГОСТ Р 58904-2020 это процесс соединения двух деталей и более, в результате которого получают неразъемное соединение материала(ов) заготовок, с

помощью нагрева и (или) давления с применением или без применения присадочного материала [13].

Сварные соединения являются наиболее распространённым видом соединения металлических конструкций. Около 90% соединений стальных конструкций выполняют сварными.

При сварке металл разогревается до тысячи и более градусов, в процессах задействован электрический ток большой силы, иногда и горючие газы. Поэтому сварщику нужно быть предельно осторожным: использовать защитную одежду и маску.

К достоинствам сварных соединений следует отнести меньший вес (экономия металла составляет 15-20% по сравнению с болтовыми и заклёпочными соединениями), снижение трудоёмкости изготовления (на 30-50% благодаря уменьшению числа операций металлообработки и их упрощению), отсутствие ослаблений в стыках, герметичность и прочность соединений.

Вместе с тем процесс сварки приводит к структурным и химическим изменениям металла в зоне сварного соединения, а также сопровождается возникновением остаточных напряжений и деформаций, что может привести к образованию трещин и в дальнейшем к разрушению конструкции при действии на неё внешних нагрузок.

Так высокотемпературный нагрев элементов при сварке и последующее охлаждение вследствие структурных изменений существенно снижают прочность металла. Нагрев стали выше 400°C приводит к резкому падению предела текучести и временного сопротивления, а при повышении температуры до 600°C сталь переходит в пластическое состояние и выключается из работы по восприятию усилий.

При выполнении сварных соединений необходимо правильно выбрать марку стали (содержание углерода в стали должно быть не более 0,2%; кипящие стали, имеющие газовые поры и шлаковые включения, т.е. концентраторы напряжений, не рекомендуются), марки сварочных

материалов (электродов, сварочной проволоки, флюсов, шлаков), формы сварного соединения и соответствующей технологии изготовления, в том числе регулирования скорости остывания шва. К примеру, для продольных швов снижение прочности составляет до 15 %, а для поперечных до 40 %. Поэтому поперечные сварные швы при усилении металлоконструкций под нагрузкой крайне не рекомендуются.

В современном строительстве для стальных конструкций применяется главным образом электродуговая сварка (ручная, полуавтоматическая и автоматическая) и электрошлаковая (бездуговая). Реже используется газозлектрическая сварка в защитной среде углекислого газа.

Согласно РД 34.15.132-96 п.1.3.6. [31] при выборе способа сварки следует иметь в виду:

- целесообразность применения механизированных способов сварки должна подтверждаться технико-экономическим расчетом;
- 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;
- в случаях, где не может быть использована автоматическая и механизированная сварка, должна применяться ручная дуговая сварка.

Сварные швы классифицируют по конструктивному признаку (стыковые и угловые), по назначению (рабочие, подлежащие расчёту на прочность, и связующие, назначаемые конструктивно), по месту выполнения (заводские и монтажные), по протяжённости (непрерывные и прерывистые;

последние приводят к концентрации напряжений по концам шва и к пониженной коррозионной стойкости в промежутках между швами, а потому применяются только в качестве связующих и для элементов с напряжениями менее $0,4 R_y$), по количеству слоёв, наложенных при сварке (однослойные и многослойные), по положению в пространстве во время их выполнения (нижние, вертикальные, потолочные, горизонтальные), по внешней форме (нормальные с плоской поверхностью, выпуклые, вогнутые). Выпуклые (усиленные) швы характерны для ручной сварки. Вогнутые угловые швы применяют в целях повышения сопротивления сварных соединений усталости (вогнутость стыковых швов является браком). Вогнутость и плоская поверхность швов достигается регулировкой режима сварки или специальной механической обработкой.

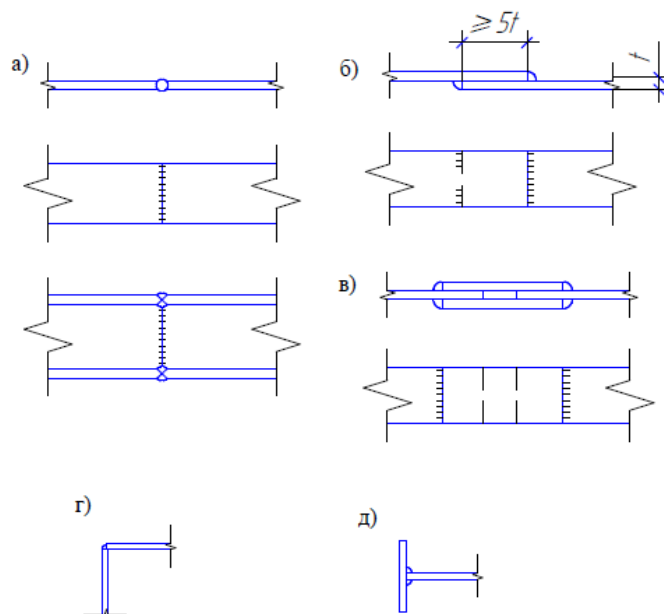
Более подробно остановимся на классификации сварных соединений по конструктивному признаку: «различают следующие виды сварных соединений: стыковые, внахлестку, угловые и тавровые (впритык).

Стыковыми называют соединения, в которых элементы соединяются торцами или кромками и один элемент является продолжением другого (рисунок 18,а). Стыковые соединения имеют наименьшую концентрацию напряжений и отличаются экономичностью.

Внахлестку называют соединения, в которых поверхности свариваемых элементов частично находят друг на друга (рисунок 18, б). Эти соединения широко применимы для сварки листовых конструкций при толщине стали $t = 2-5$ мм. Разновидностью соединения внахлестку является соединение с накладками (рисунок 18, в). Соединения внахлестку отличаются простотой обработки элементов под сварку, но по расходу металла они менее экономичны, чем стыковые. Соединения внахлестку вызывают значительную концентрацию напряжений.

Угловыми называют соединения, в которых свариваемые элементы расположены под углом друг к другу (рисунок 18, г)

Тавровые соединения отличаются от угловых тем, что в них торец одного элемента приваривается к поверхности другого элемента (рисунок 18,д)» [29].



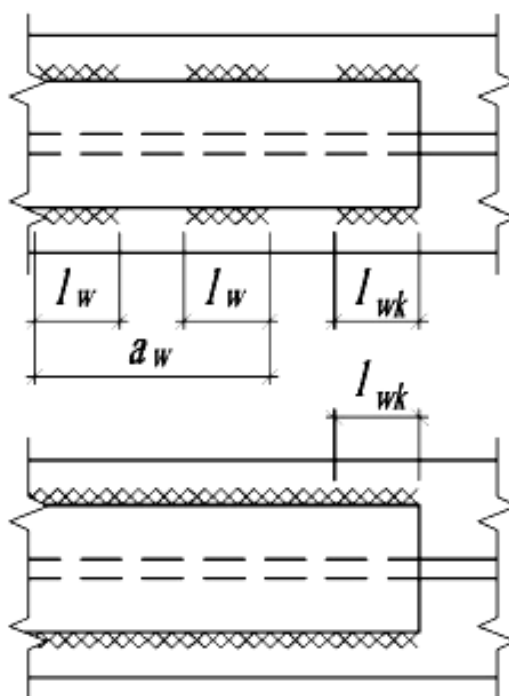
а- стыковое; б- внахлестку; в- с накладками, г- угловое; д - тавровое

Рисунок 18 - Виды сварных соединений

«При использовании сварки для прикрепления элементов усиления необходимо предусматривать меры по уменьшению и регулированию сварочных деформаций. Для этого катеты швов следует принимать минимально допустимыми по расчёту с учётом рекомендаций СП 16.13330.2017 п. 14.1 [36].

В случаях усиления нагруженных конструкций 3 и 4 классов, эксплуатируемых при температуре выше минус 30 °С в неагрессивной среде, рекомендуется использовать прерывистые (шпоночные) швы (рисунок 19, а). Шаг шпонок следует принимать максимально допустимым по расчёту, но не выше $80i_{\min}$ в растянутых и $40i_{\min}$ в сжатых элементах усиления. Здесь i_{\min} – минимальный радиус инерции элемента усиления относительно его собственной центральной оси.

Для крепления элементов усиления в конструкциях 1 и 2 классов используются только сплошные швы (рисунок 19, б)» [29].



а – прерывистыми швами; б – сплошными швами

Рисунок 19 - Присоединения элементов усиления

«Проектируя сварное соединение для создания усиленной конструкции необходимо также 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» [28].

Сварные конструкции контролируют на всех этапах их изготовления.

Контроль качества сварных соединений может быть:

- предварительным – это первичный контроль сварного соединения для определения качества сварки. Такой контроль предупреждает образование дефектов, он заключается в контроле электродов, флюсов, соблюдения режимов работы и т.д.;

- окончательный – это контроль, который оценивает результаты технологического процесса, его суть заключается в определении качества швов и выявлении дефектов.

Все местные уступы и неровности, имеющиеся на собираемых деталях и препятствующие их соединению в соответствии с требованиями чертежей, надлежит до сборки устранять зачисткой в виде плавных переходов с помощью абразивного круга или напильника. При обработке абразивным инструментом следы зачистки должны быть направлены вдоль кромок.

В процессе сборки должно быть исключено попадание влаги, масла и других загрязнений в разделку соединений и на прилегающие поверхности [31].

После окончания сварки со шва и околошовной зоны должен быть удален шлак, наплывы и брызги металла. Удаление шлака должно производиться после остывания шва (через 1-2 минуты после потемнения). Приваренные сборочные приспособления надлежит удалять без применения ударных воздействий и повреждения основного металла, а места их приварки зачистить до основного металла с удалением всех дефектов. Снятие

усиления, зачистку корня шва, лицевой стороны шва и мест установки выводных планок рекомендуется осуществлять с помощью высокооборотных электрических шлифовальных машинок с абразивным кругом. При этом риски от абразивной обработки металла должны быть направлены вдоль кромок свариваемых деталей [31].

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 ГОСТ 23118-2012 [8].

Существует множество методов контроля качества и надежности сварных швов и соединений, которые разделяют на разрушающие и неразрушающие.

Разрушающие методы контроля подразумевают механическое или другое воздействие на сварной шов, с целью выявить его погрешности, к примеру, методом вскрытия шва высверливанием для контроля угловых швов.

При проведении контроля качества разрушающим методом часть или весь сваренный участок теряет свои конструктивные свойства. По этой причине более популярными и целесообразными считаются рассмотренные далее неразрушающие методы контроля сварных швов.

На данный момент различают следующие наиболее часто применяемые неразрушающие методы:

- внешний осмотр;
- радиационный метод - основан на способности рентгеновского и гамма-излучения проникать через металлы и фиксировать на фотопленке дефекты, встречающиеся на его пути;
- магнитное исследование - используется явление электромагнетизма; прибор создает вокруг исследуемой области магнитное

поле, поток линий которого, проходя через металл, искривляется в местах дефектов;

- ультразвуковой метод - использует способность ультразвуковых волн отражаться от границ, разделяющих две упругие среды с разными акустическими свойствами;

- капиллярный метод - основан на капиллярной активности жидкостей - их способности втягиваться, проникать в мельчайшие каналы (капилляры), имеющиеся на поверхности материалов, в том числе поры и трещины сварных швов;

- контроль проницаемости - эти испытания выполняются с помощью керосина, а также воздуха или воды под давлением.

По внешнему осмотру и измерениям качество швов должно удовлетворять требованиям таблицы 1 СП 70.13330.2012 [39].

Таблица 1– Проверка качества сварных швов

Элементы сварных соединений, наружные дефекты	Требования к качеству, допустимые размеры дефектов
1	2
Поверхность шва	Равномерно-чешуйчатая, без прожогов, наплывов, сужений и перерывов. Плавный переход к основному металлу (следует оговорить в чертежах КМ и КМД)
Подрезы	Глубина до 5% толщины свариваемого проката, но не более 1 мм
Дефекты удлиненные и сферические одиночные	Глубина до 10% толщины свариваемого проката, но не более 3 мм. Длина - до 20% длины оценочного участка*
Дефекты удлиненные и сферические в виде цепочки или скопления	Глубина до 5% толщины свариваемого проката, но не более 2 мм. Длина - до 30% длины оценочного участка. Длина цепочки или скопления - более удвоенной длины оценочного участка
Дефекты (непровары, цепочки и скопления пор), соседние по длине шва	Расстояние между близлежащими концами - не менее 200 мм
Швы сварных соединений конструкций, возводимых или эксплуатируемых в районах с расчетной температурой ниже минус 40°С и до минус 65°С включительно	

Продолжение таблицы 1

1	2
Непровары, несплавления, цепочки и скопления наружных дефектов	Не допускаются
Подрезы: вдоль усилия местные поперек усилия	Глубина - не более 0,5 мм при толщине свариваемого проката до 20 мм и не более 1 мм - при большей толщине Длина - не более удвоенной длины оценочного участка

При этом трещины всех видов и размеров не допускаются.

Выводы по первой главе

В ходе эксплуатации или реконструкции зданий и сооружений нередко выявляется необходимость усиления металлических ригелей: составных и прокатных балок. Главной особенностью при эксплуатации стальных балок является их нахождение под нагрузкой. В результате длительной эксплуатации металлические балки могут подвергаться сильной коррозии.

При эксплуатации зданий нередко выявляется необходимость увеличения несущей способности стальных балок, нагруженных плитами по верхним поясам.

В известной технической литературе предлагаются различные варианты усиления, в частности увеличением сечения, без конкретизации расположения нагрузки. В магистерской диссертации Наклоннова А.В. был установлен факт влияния схем усиления на несущую способность усиленной конструкции.

В этой связи, научный интерес представляет исследование вопроса влияния схем усиления на несущую способность балок.

Для разработки данной темы были поставлены следующие задачи:

- теоретическое обоснование работы балок с различными вариантами усиления;
- экспериментальное исследование работы усиливаемых балок.

Глава 2 Теоретическое исследование работы балок

2.1 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра

Теоретические исследования проводились с учётом возможностей проведения экспериментальных исследований на установке для испытания балочных конструкций. Установка позволяет испытывать балки пролётом 1,5 м с нагружением двумя силами, расположенными симметрично на расстоянии 0,5 м от опор, как показано на рисунке 20.

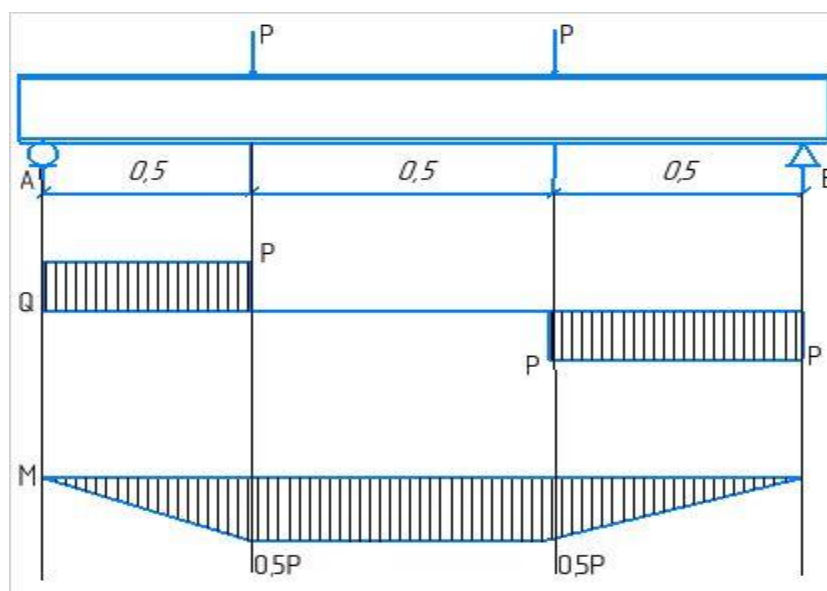


Рисунок 20 – Схема нагружения двутавровой балки

«Схема закрепления балки: шарнирно опертая. Прилагаемая нагрузка: две сосредоточенные силы равной величины, симметрично расположенные относительно середины пролёта.»[24].

«Прямой изгиб балки чаще всего подразделяют на чистый изгиб и поперечный изгиб. При чистом изгибе в сечении балки возникает только один внутренний силовой фактор – изгибающий момент. При поперечном

изгибе в сечениях балки возникают два силовых фактора (внутренних усилия): изгибающий момент M и поперечная сила Q .»[24].

При практических испытаниях в большинстве случаев изгибающий момент может иметь одно из решающих значений при выборе сечения и проверке на прочность многих балочных конструкций. При возникновении (действии) возникающих нагрузок балка имеет свойство прогибаться так, что нижние волокна равномерно удлиняются, а верхние волокна наоборот равномерно укорачиваются, изгибу балки сопутствует появление нормальных напряжений.

Кроме равномерно удлиняющихся и равномерно укорачивающихся волокон не стоит забывать и про волокна находящиеся в промежуточном слое, длина которых не меняется. Этот промежуточный слой называется нейтральным, а линия называется нейтральной линией или нейтральной 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.»[24].

«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. 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»[24].

«При всем том тщательные исследования в данной области часто выявляют, что даже искажения, вносимые касательными напряжениями, мало влияют на нормальные напряжения»[24].

Таким образом, при определении нормальных напряжений в случае поперечного изгиба вполне применима теория чистого изгиба. Напряжения являющимися касательными в большинстве случаев не учитываются в теоретических расчетах на прочность.

«Касательные напряжения в расчетах на прочность, как правило, не учитываются. Выбор расчетных сечений и контрольных точек. На рисунке 23 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»[24].

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:

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

где σ_m – 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 рисунке. 23:

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

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

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

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

Напряженно-деформированное упругое состояние балки

«Для балок 1-го класса, когда напряжения возникающие по всей площади сечения не могут превысить расчетного сопротивления $|\sigma| \leq R_y$ (упругое состояние) [36], балка рассчитывается на изгиб и на срез согласно СП 16.13330.2017. Стальные конструкции » [36].

«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» [31];

M – максимальный расчетный изгибающий момент;

$W_{xn,min}$ – 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» [36].

Расчетное сопротивление стали сдвигу определяется по формуле 6 в соответствии с [31]:

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

Эпюры нормальных (σ) напряжений и касательных (τ) напряжений для упругого состояния сечения балки показаны на рисунке 21.

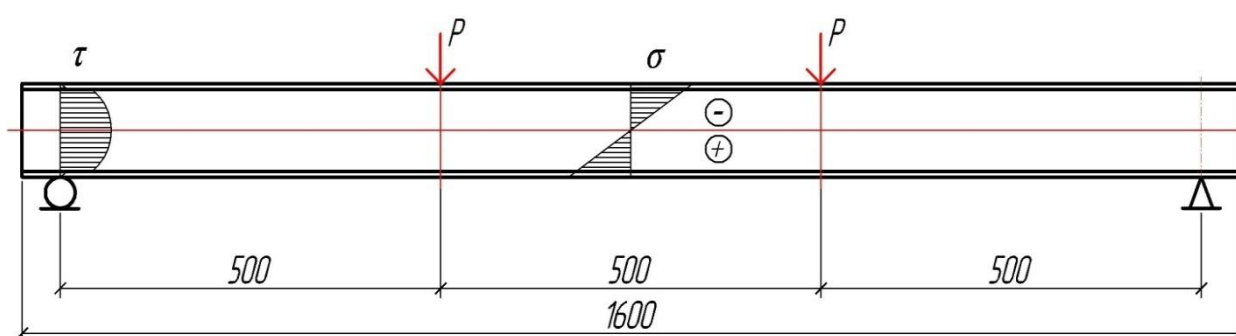


Рисунок 21 – Эпюры нормальных и касательных напряжений для упругой работы

Таким образом, нормальные напряжения в сечениях двутавровых балок определяются по следующей формуле:

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

где M – максимальный изгибающий момент, найденный для рассматриваемого случая 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.

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 [1], допускается развитие некоторой доли пластических деформаций.

Эпюры нормальных (σ) напряжений и касательных (τ) напряжений для упруго-пластического состояния сечения исследуемой балки показаны на рисунке 22.

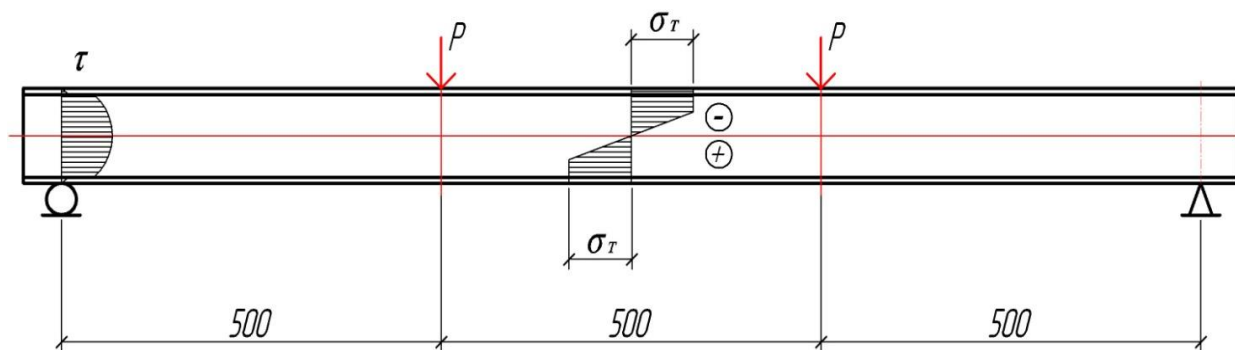


Рисунок 22 – Эпюры нормальных и касательных напряжений для упругопластической работы

Нормальные напряжения с учетом возможности развития пластических деформаций определяются по формуле в соответствии с требованиями [1]:

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

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

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 [2] 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 [2].

Напряженно-деформированное пластическое состояние балки

Эпюры нормальных (σ) напряжений и касательных (τ) напряжений для пластического состояния сечения балки показаны на рисунке 23.

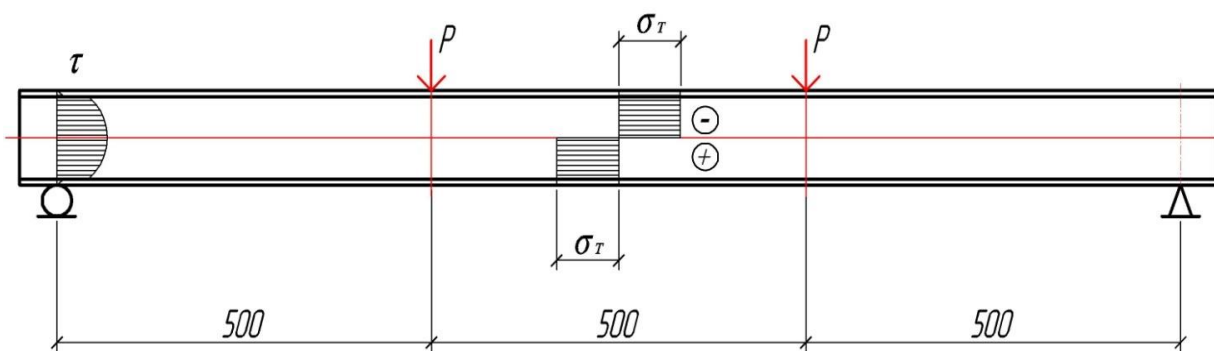


Рисунок 23 – Эпюры нормальных и касательных напряжений пластической работы (условный пластический шарнир).

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 [1]. Такое состояние называют «условным шарниром пластичности»[1].

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

Для испытания были подготовлены пять образцов: двутавры №12 по ГОСТ 8239-89, длиной 1600 миллиметров (пролёт 1500 миллиметров); форма сечения представлена на рисунке 24.

По приведенным данным из сертификата металла марка стали всех подготовленных образцов – СтЗпс.

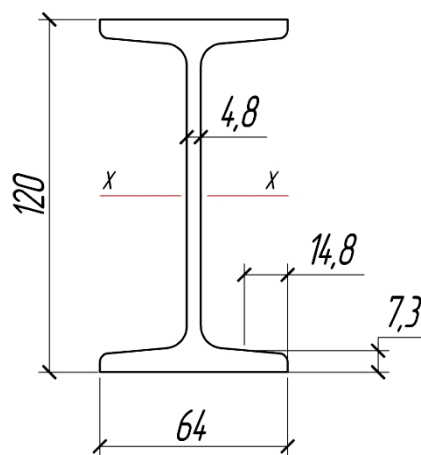


Рисунок 24 – Поперечное сечение двутавра

Номинальные размер двутавров, площадь поперечного сечения, масса и справочные значения для осей приведены в таблице 7 и соответствуют [41].

Таблица 2 – Справочные данные двутавра №12

№	Размеры					Площадь поперечного сечения	Масса 1 м	Справочные значения для осей						
	h	b	s	t	R			X – X				Y – Y		
								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

Усиление двутавра производится полосовым элементом: сечение 100x10мм, длиной 700 мм в соответствии с рисунком 25.



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

Рисунок 25 – Схема усиления

При усилении поперечное сечение изменяется; меняется положение центра 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 – рисунок 26.

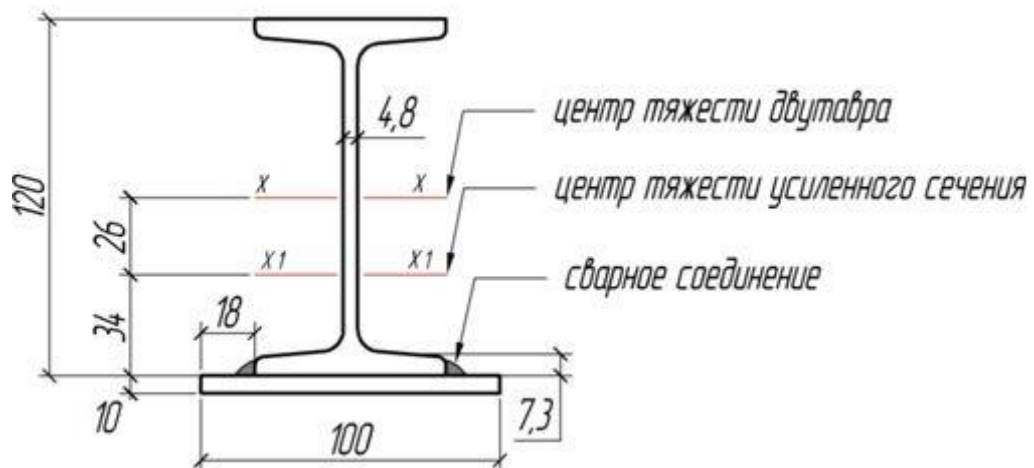


Рисунок 26 – Усиленное сечение

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;

$\sum S_x$ – сумма статических моментов относительно оси x .

В соответствии с формулой 10 центр тяжести усиленных увеличением сечения образцов, относительно центра тяжести эталонного образца, смещен на $y_{max} = 2.6 \text{ см}$ 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 рисунком 29:

Момент инерции усиленного сечения относительно оси x :

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

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

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

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

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

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

$$P_{max} = \frac{W_x^{сж} \sigma_m}{a} = \frac{68,3 \cdot 42,8}{50} = 58,46 \text{ кН}, \quad (14)$$

где σ_m – предел текучести СтЗпс (в дальнейшем определен по испытанию эталонного образца $42,8 \text{ кН/см}^2$);

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

$W_{x1}^{сж}$ – 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 рисунке 8:

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

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

Момент сопротивления усиленного сечения для сжатого волокна $68,3 \text{ см}^3$ волокон лишь незначительно больше момента сопротивления неусиленного двутавра $W_x = 58,4 \text{ см}^3$, что является предпосылкой для вывода о недостаточной эффективности предложенного варианта усиления. Для окончательного вывода необходимо проведение экспериментального исследования.

Эталонный двутавр №12:

Ядровое расстояние в направлении оси «Y»:
 $\rho_y = W_x / A = 58.4 / 14.7 = 3.98 \text{ см};$

Ядровое расстояние в направлении оси «X»:
 $\rho_x = W_y / A = 8.72 / 14.7 = 0.59 \text{ см}.$

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси x для растянутого волокна определяется как:

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

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

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

– для сжатого волокна $\rho_y^{сж} = W_x^{сж} / \Sigma A = 68,3 / 24,7 = 2,77 \text{ см},$

– для растянутого волокна $\rho_y^{раст} = W_x^{раст} / \Sigma A = 158,7 / 24,7 = 6,43 \text{ см},$

где $\Sigma A = A_{\text{дб}} + A_{\text{пол}} = 14,7 + 10 = 24,7 \text{ см}^2$.

Анализ: $2,77 \text{ см} \ll 3,98 \text{ см}; \quad 6,43 \text{ см} \gg 3,98 \text{ см}$.

Вывод: усиление неэффективно, слабая сжатая зона!

2.3 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного двумя полосами - 50x10 симметрично с двух сторон стенки на сварке



Рисунок 27 – Усиление двумя полосами 50x10

Момент инерции усиленного сечения относительно оси «X»:

$$I_x = I_x^{\text{дб}} + I_x^{\text{пол.}} = I_x^{\text{дб}} + 2 \frac{t_{\text{пол.}} \cdot b_{\text{пол.}}^3}{12} = 350 + 2 \frac{1 \cdot 5^3}{12} = 370,8 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси «X»:

$$W_x = \frac{I_x \cdot 2}{h_{\text{дб}}} = \frac{370,8 \cdot 2}{12} = 61,8 \text{ см}^3$$

$$\Sigma A = 14,7 + 2 \cdot 5 = 24,7 \text{ см}^2$$

$$y = W_x / \Sigma A = 61,8 / 24,7 = 2,5 \text{ см}$$

2.4 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного двумя полосами - 100x10 симметрично с двух сторон стенки на сварке



Рисунок 28 – Усиление двумя полосами 100x10

Момент инерции усиленного сечения относительно оси «X»:

$$I_x = I_{x_{дв}} + I_{пол} = I_{x_{дв}} + 2 \frac{I_{пол} \cdot I_{пол}^3}{12} = 350 + 2 \frac{1 \cdot 10^3}{12} = 516.7 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси «X»:

$$W_x = \frac{I_x \cdot 2}{h_{дв}} = \frac{516.7 \cdot 2}{12} = 86.1 \text{ см}^3 \gg 58.4 \text{ см}^3$$

$$\sum A = 14.7 + 2 \cdot 10 = 34.7 \text{ см}^2$$

$$y = W_x / \sum A = 86.1 / 34.7 = 2.48 \text{ см}$$

2.5 Теоретическое обоснование работы изгибаемого двутавра, усиленного двумя уголками L75х6 симметрично с двух сторон стенки на сварке

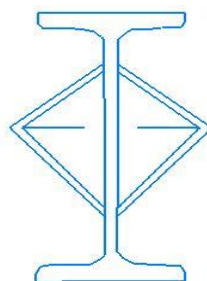
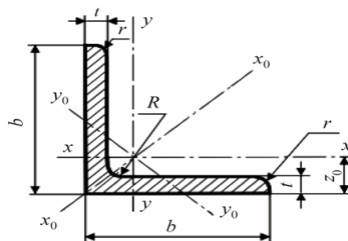


Рисунок 29 – Усиление двумя уголками L75х6

Момент инерции усиленного сечения относительно оси «X»:

$$I_x = I_{x0} + I_{y0} = I_{x0} + 2 \cdot I_{y0} = 350 + 2 \cdot 73,87 = 497 \text{ см}^4.$$

Момент сопротивления усиленного сечения относительно оси «X»:

$$W_x = \frac{I_x \cdot 2}{h_{\partial\partial}} = \frac{497 \cdot 2}{12} = 86,1 \text{ см}^3 \gg 58,4 \text{ см}^3$$

$$\sum A = 14,7 + 2 \cdot 8,78 = 32,26 \text{ см}^2$$

$$y = I_x / \sum A = 83 / 32,26 = 2,57 \text{ см}$$

Обоснование рациональности схемы усиления:

- возможность применения сварки;
- увеличение моментов сопротивления, симметричное для сжатых и растянутых волокон.

Таблица 3 – Справочные данные уголков L75

Но мер уго лка	b	t	R	r	Площадь сечения, см ²	Масса 1 м уголка , кг	Справочные величины для осей									
							x – x			X _o – X _o		Y _o – Y _o			I _{xy} , см ⁴	z _o , см
							I _x , см ⁴	W _x , см ³	i _x , см	I _{x0max} , см ⁴	i _{x0max} , см	I _{y0min} , см ⁴	W _{y0} , см ³	i _{y0min} , см		
7,5	75	5	9	3	7,39	5,80	39,53	7,21	2,31	62,65	2,91	16,41	5,74	1,49	23,10	2,02
		6			8,78	6,89	46,57	8,57	2,30	73,87	2,90	19,28	6,62	1,48	27,30	2,06
		7			10,15	7,96	53,34	9,89	2,29	84,61	2,89	22,07	7,43	1,47	31,20	2,10
		8			11,50	9,02	59,84	11,18	2,28	94,89	2,87	24,80	8,16	1,47	35,00	2,15
		9			12,83	10,07	66,10	12,43	2,27	104,72	2,86	27,48	8,91	1,46	38,60	2,18

Выводы по второй главе

При усилении двутавра №12 следует идти по пути увеличения жесткости при изгибе.

При теоретическом расчете выяснилось, что несимметричное усиление образца Б2, усиленного полосой, прикрепленной к нижней полке недостаточно эффективно.

Наибольшая эффективность для двутавра №12 является – усиление с двух сторон стенки симметрично.

Глава 3 Экспериментальное исследование

3.1 Методика испытания балок

Для испытания металлических балок были подготовлены образцы пяти серий по ГОСТ 8239-89 длиной 1600 миллиметров, расстояние между опорными частями установки 1500 миллиметров.

По данным из сертификата на металл, марка стали пяти подготовленных образцов - Ст3пс5.

Таблица 4 – Образцы для испытания

Поз.	Отправочная марка	Кол-во	Сечение, мм	Длина, мм	Примечание
1	Б1	1	I 12	1600	Без усиления
2	Б2	1	I 12	1600	С усилением
3		1	-100x10	700	Элемент усиления
4	Б3	1	I 12	1600	С усилением
5		2	-50x10	700	Элемент усиления
6	Б4	1	I 12	1600	С усилением
7		2	-100x10	700	Элемент усиления
8	Б5	1	I 12	1600	С усилением
9		2	L 75x6	700	Элемент усиления

Установка для испытания на поперечный изгиб.

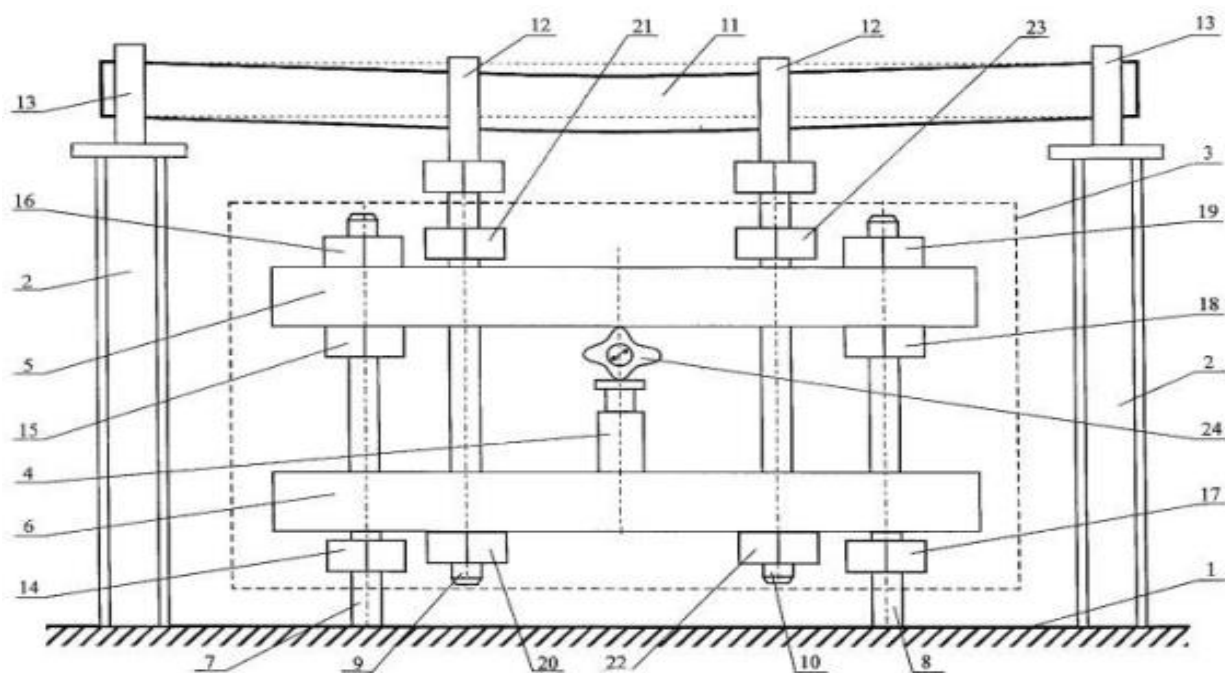


Рисунок 30 – Испытательный стенд

«Установка для испытания балочных конструкций состоит из основания 1, жестко установленных на нем опорных стоек 2, нагружающего устройства, которое выполнено с возможностью приложения знакопеременных нагрузок и снабжено реверсным механизмом 3 и источником дискретной нагрузки 4. Реверсный механизм 3 выполнен в виде двух пар вертикальных тяг, которые соединены между собой двумя траверсами 5 и 6 с отверстиями под эти тяги. Одна пара тяг 7 и 8 жестко установлена на основании 1, а другая пара тяг 9 и 10 выполнена с возможностью закрепления на испытываемой балочной конструкции 11 посредством хомутов 12 рамной конструкции. При этом концы балочной конструкции 11 закреплены в опорных стойках 2 посредством элементов 13. Траверсы 5 и 6 установлены горизонтально одна над другой, а на нижней траверсе 6 установлен источник дискретной нагрузки 4, который выполнен в виде гидравлического домкрата. Каждая тяга 7 и 8, 9 и 10 снабжена регулировочными гайками: тяга 7 - гайками 14, 15, и 16, тяга 8 - гайками 17, 18 и 19, тяга 9 - гайками 20 и 21, тяга 10 - гайками 22 и 23. Регулировочные

гайки 14-23 предназначены для регулировки свободного хода траверс 5, 6 и тяг 9 и 10 и изменения направления действия нагрузок, прикладываемых к испытываемой балочной конструкции 11, поскольку источник дискретной нагрузки 4 действует всегда в одном направлении. Кроме того, установка снабжена динамометром 24, фиксирующим прикладываемые к балочной конструкции 11 нагрузки.»[40].

«Установка для испытания балочных конструкций работает следующим образом.»[40].

«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.»[40].

«Для создания прогиба вниз (Фиг.2) 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, воздействующий на балочную конструкцию 11 в местах установки тяг 9 и 10. Таким образом осуществляют испытание балочной конструкции в одном направлении приложения изгибающего момента - положительном.»[40].

«Для изменения знака приложения изгибающего момента на противоположный - отрицательный, необходимо ослабить гайки 16, 20 и 19, 22 (Фиг.3), 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»[40].



Рисунок 31 - Установка для испытания балочных конструкций

Нагрузка прикладывается симметрично поэтапно (каждый этап – 100 кг) к верхней полке в двух точках посредством траверсы и тяг на расстоянии

500 мм от крайних опор. Величина нагрузки контролируется по показаниям динамометра.

По мере нагружения каждого этапа снимались показания по приборам, контролирующим прогибы и напряжения в середине пролета, что показано на рисунке 32: прогибы – с помощью прогибомера Аистова; напряжения – рычажными тензометрами Гугенбергера.

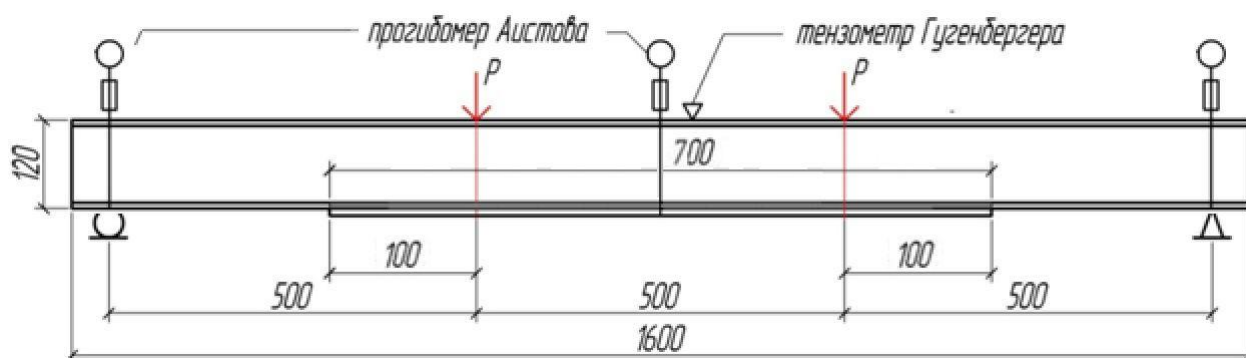


Рисунок 32 – Схема нагружения и расстановки приборов

Цель испытания: получить действительное значение σ_T .

Испытание эталонного образца Б1, первой серии (рисунок 33) проводилось в следующем порядке:

1. Установка балки на опоры.
2. Постепенное нагружение этапами по 100 кг.
3. Фиксирование результатов измерений на каждом этапе нагружения по тензометру Гугенбергера и прогибомеру Аистова.
4. Фиксирование максимальной нагрузки на момент появления текучести образца.

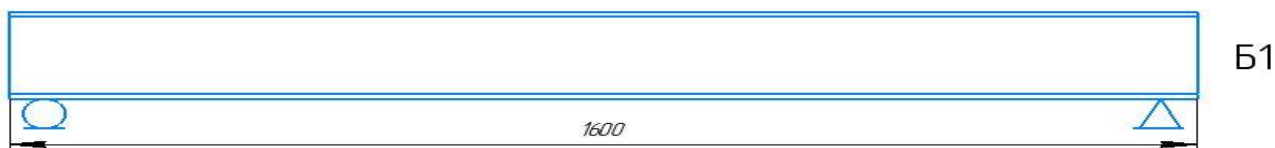


Рисунок 33 – Эталонный образец, балка двутавровая без усиления

Испытание образца Б2, второй серии (рисунок 34) иначе:

1. Установка балки на опоры.
2. Усиление балки полосой, привариваемой к нижней полке.
3. Постепенное нагружение этапами по 100 кг.
4. Фиксирование результатов измерений на каждом этапе нагружения по тензомеру Гугенбергера и прогибомеру Аистова.
5. Фиксирование максимальной нагрузки на момент появления текучести образца.

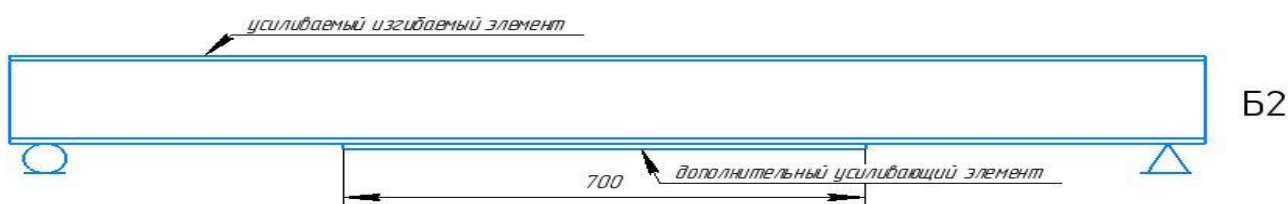


Рисунок 34 - Усиление полосой в нижней части - 100x10

Испытания образцов Б3-Б5, третьей, четвертой и пятой серий (рисунок 35-37) проводились в следующем порядке:

1. Установка балки на опоры.
2. Усиление балки двумя полосами (уголками), привариваемыми симметрично с двух сторон стенки.
3. Постепенное нагружение этапами по 100 кг.
4. Фиксирование результатов измерений на каждом этапе нагружения по тензомеру Гугенбергера и прогибомеру Аистова.

5. Фиксирование максимальной нагрузки на момент появления текучести образца.

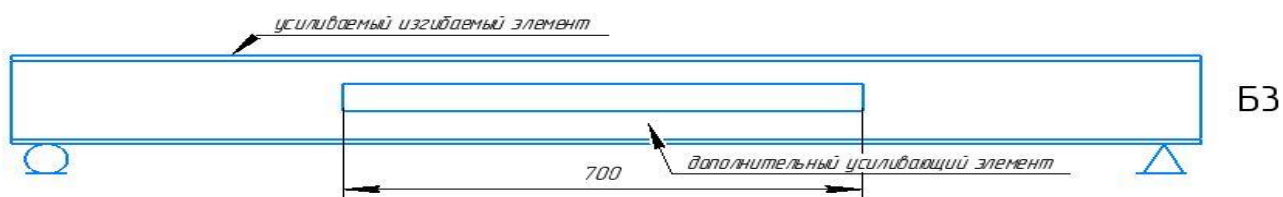


Рисунок 35- Усиление двумя полосами - 50x10 симметрично с двух сторон стенки

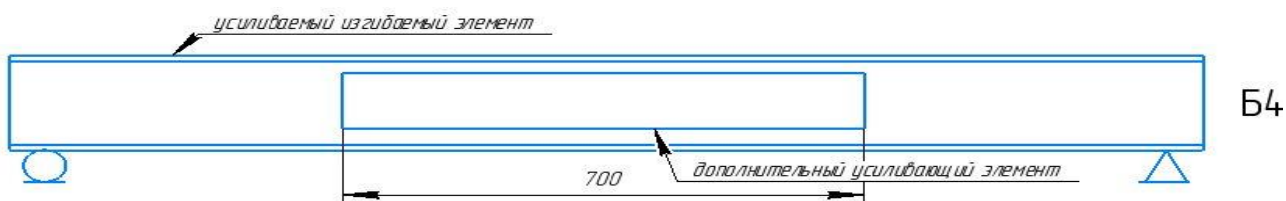


Рисунок 36 - Усиление двумя полосами - 100x10 симметрично с двух сторон стенки

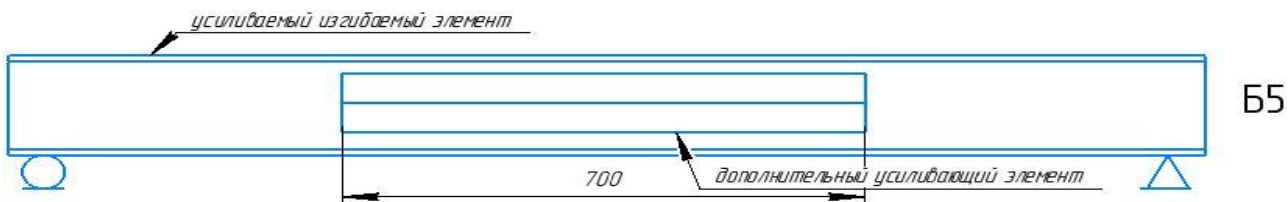


Рисунок 37 - Усиление двумя уголками L75x6 симметрично с двух сторон стенки

3.2 Результаты испытания образца марки Б1, эталонной балки



Рисунок 38– Испытание эталонного образца

Результаты испытания балки Б1 (эталонный образец) отражены в таблице 5 и на рисунках 38-39.

Таблица 5 – Результаты испытания эталонной балки

Марка балки	Усиление	Пред. нагр., теоретич., тН	Пред. нагр., практич., тН	Прогиб, мм
Б1	–	4,99	5,5	9,29

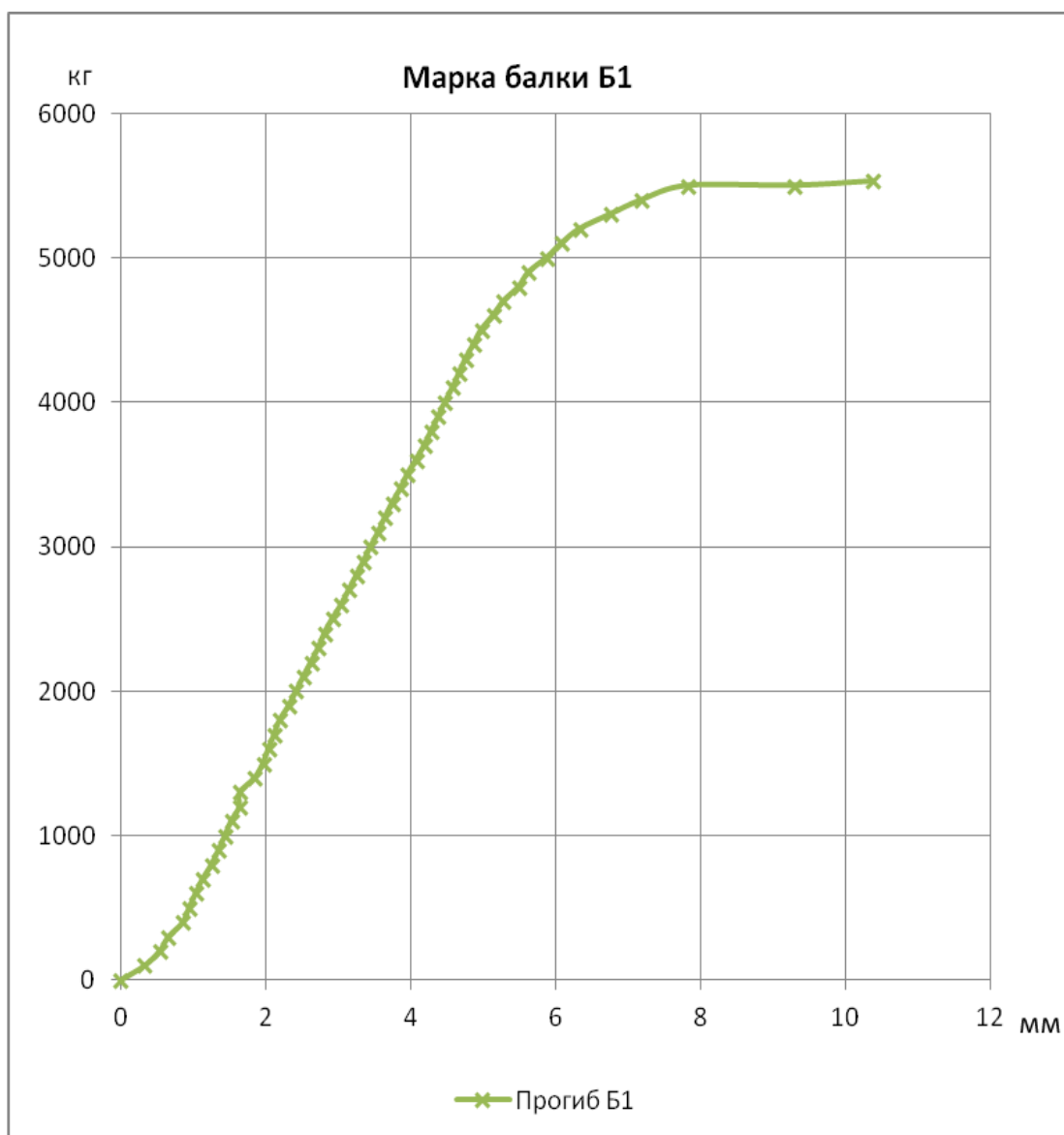


Рисунок 39 – Диаграмма прогиб - нагрузка образца Б1 (эталонного образца)

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

Предел текучести σ_T эталонного образца определяется как

$$\sigma_T = \frac{P_{T.a}}{W_x} = \frac{50 \text{ кН} \cdot 50}{58.4} = 42.8 \text{ кН/см}^2$$

где P_m – нагрузка предела текучести СтЗпс (по испытанию эталонного образца);

a – расстояние от опоры до приложенных двух сосредоточенных нагрузок;

W_x – момент сопротивления сечения брутто относительно осей.

При $\sigma_T=42,8$ в теоретических исследованиях образца Б1(эталонная балка) максимальная нагрузка $P_{max}=49,99$ кН/см², что в свою очередь оказалась не на много меньше чем при практических испытаниях в которых $P_{max}=55$ кН/см².

Вывод: нагрузка при практическом испытании эталонного образца балки Б1 примерно совпадает с теоретическими расчетами, разница между теоретическим и практическим испытанием составляет менее 10%.

3.3 Результаты испытания образца марки Б2, усиленного полосой 100x10 прикрепленной к нижней полке

Испытание образца марки Б2, (рисунок 40) проводилось в следующем порядке:

- 1) Установка балки на опорные стойки.
- 2) Усиление балки полосой -100x10, привариваемой к нижней полке.
- 3) Постепенное нагружение этапами по 100 кг.
- 4) Фиксирование результатов измерений на каждом этапе нагружения по тензомеру Гугенбергера и прогибомеру Аистова.
- 5) Фиксирование максимальной нагрузки на момент появления текучести образца.



Рисунок 40– Прикрепление полосы - 100x10 к нижнему поясу испытываемой балки Б2



Рисунок 41– Испытание образца усиленного полосой в нижней части- 100x10

Результаты испытания балки Б2 были отражены в таблице 6 и на рисунках 41-42.

Таблица 6 – Результаты испытания эталонной балки

Марка балки	Усиление	Пред. нагр.,теоретич., тН	Пред. нагр.,практич., тН	Прогиб, мм
Б2	-100x10	5,84	5,9	6,05

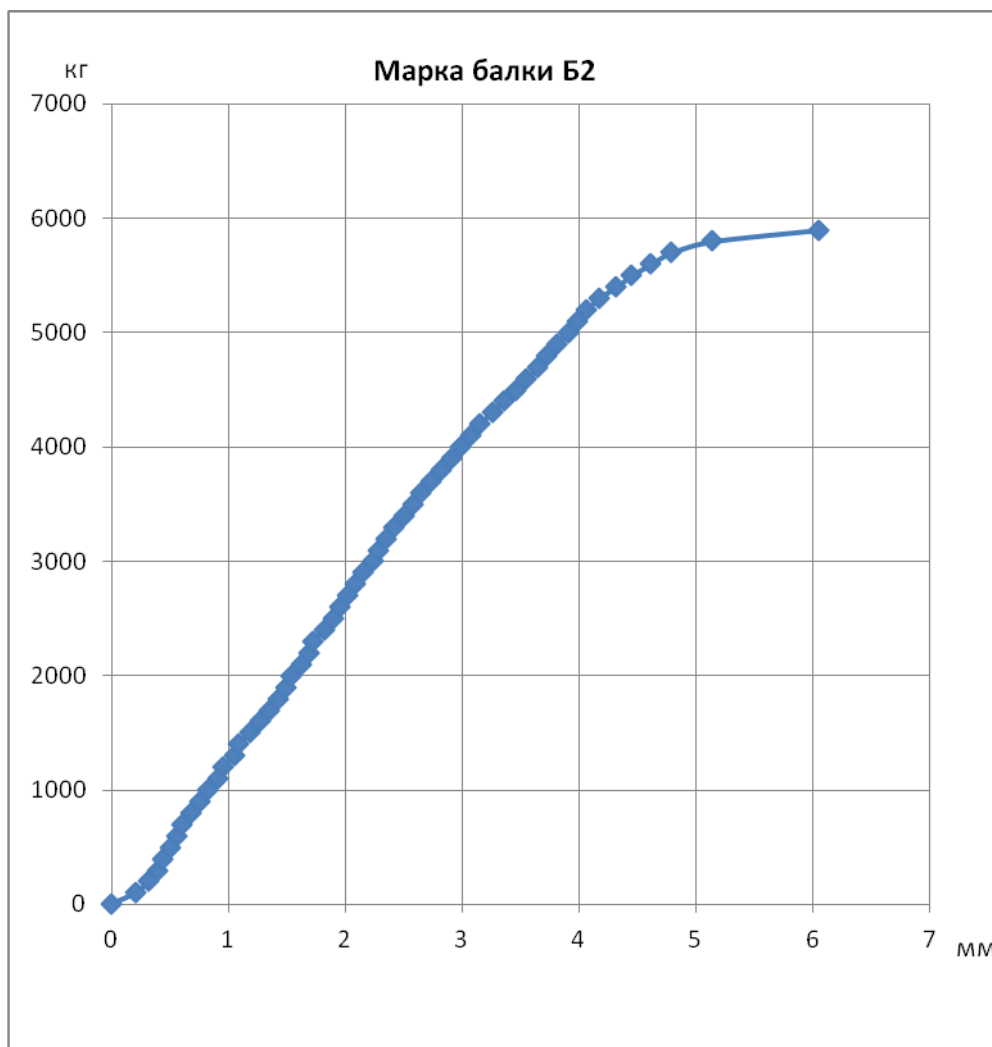


Рисунок 42 – Диаграмма прогиб - нагрузка образца Б2 (усиленного полосой в нижней части - 100x10)

В результате проведенного испытания балки Б2 предельная нагрузка составила 5,9 тн, что ничтожно выше предельной нагрузки образца Б1 (эталонного образца); это превышение составляет 400 кг. Вид усиленной балки Б2 после испытания показан на рисунок43.

При $\sigma_T=42,8$ в теоретических исследованиях образца Б2 максимальная нагрузка $P_{max}=58,46$ кН/см², что в свою очередь оказалась не на много меньше чем при практических испытаниях в которых $P_{max}=59$ кН/см².

Вывод: нагрузка при практическом испытании эталонного образца балки Б2 примерно совпадает с теоретическими расчетами, разница между теоретическим и практическим испытанием составляет менее 2%.



Рисунок 43 - Вид усиленной балки Б2 после испытания

3.4 Результаты испытания образца марки БЗ, усиленного двумя полосами 50x10, прикрепленными с двух сторон стенки симметрично

Испытание образца марки БЗ (рисунок44) проводилось в следующем порядке:

- 1) Установка балки на опорные стойки.
- 2) Усиление балки двумя полосами -50x10, привариваемыми симметрично с двух сторон стенки.
- 3) Постепенное нагружение этапами по 100 кг.
- 4) Фиксирование результатов измерений на каждом этапе нагружения по тензомеру Гугенбергера и прогибомеру Аистова.
- 5) Фиксирование максимальной нагрузки на момент появления текучести образца.



Рисунок 44– Прикрепление двух полос - 50x10 с двух сторон стенки симметрично образца балки БЗ



Рисунок 45– Испытание образца Б3, усиленного двумя полосами - 50x10 симметрично с двух сторон

Результаты испытания балки Б3 были отражены в таблице 7 и на рисунках 45-46.

Таблица 7 – Результаты испытания эталонной балки

Марка балки	Усиление	Пред. нагр.,теоретич., тН	Пред. нагр.,практич., тН	Прогиб, мм
Б3	-50x10 (2)	5,29	5,9	10,42

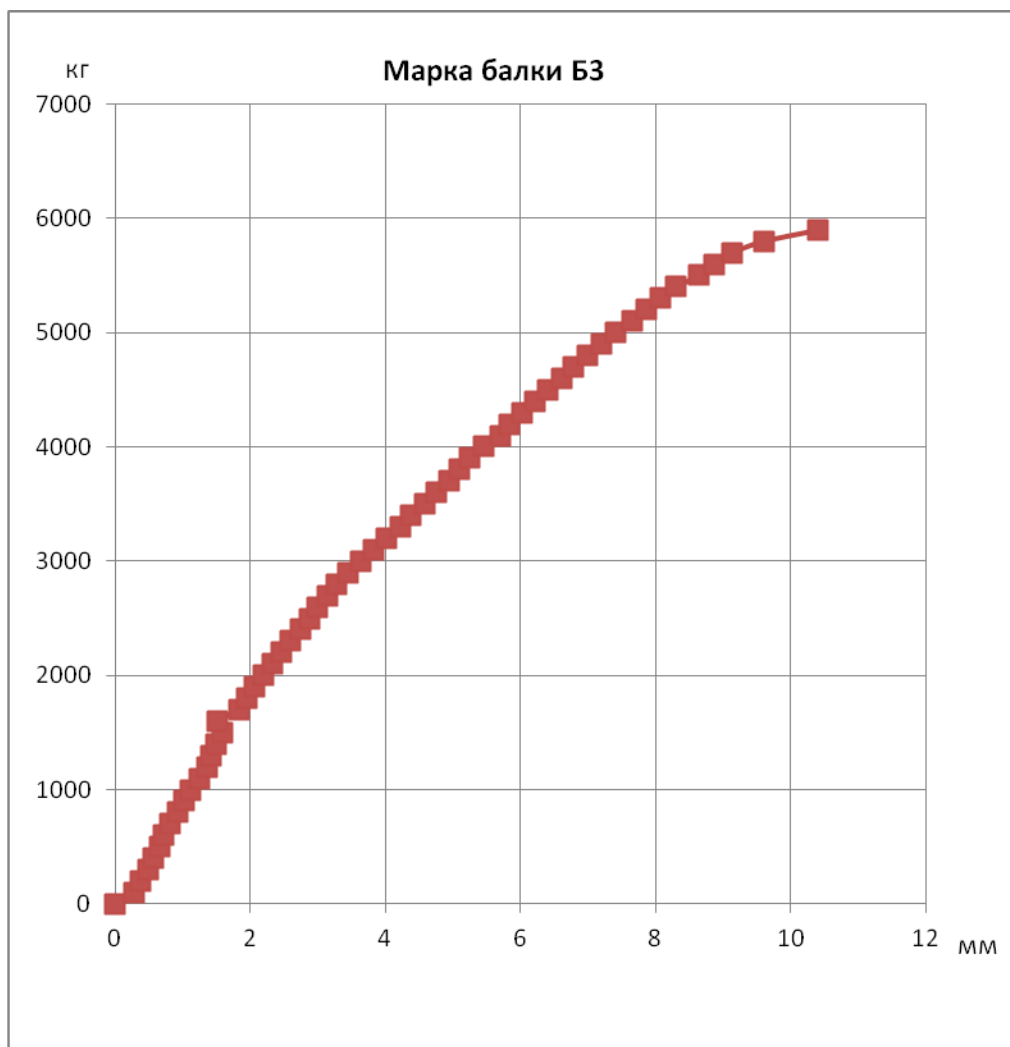


Рисунок 46 – Диаграмма прогиб - нагрузка образца БЗ (усиленного двумя полосами - 50x10 симметрично с двух сторон)

В результате проведенного испытания балки БЗ предельная нагрузка составила 5,9 тн, что ничтожно выше предельной нагрузки образца Б1 (эталонного образца); это превышение составляет 400 кг. Вид усиленной балки БЗ после испытания показан на рисунок 47.

При $\sigma_T=42,8$ в теоретических исследованиях образца БЗ максимальная нагрузка $P_{max}=52,9$ кН/см², что в свою очередь оказалась не на много меньше чем при практических испытаниях в которых $P_{max}=59$ кН/см².

Вывод: нагрузка при практическом испытании эталонного образца балки БЗ примерно совпадает с теоретическими расчетами, разница между теоретическим и практическим испытанием составляет менее 11%.



Рисунок 47 - Вид усиленной балки Б3 после испытания

3.5 Результаты испытания образца марки Б4, усиленного двумя полосами 100х10, прикрепленными с двух сторон стенки симметрично



Рисунок 48– Прикрепление двух полос - 100х10 с двух сторон стенки симметрично образца балки Б4

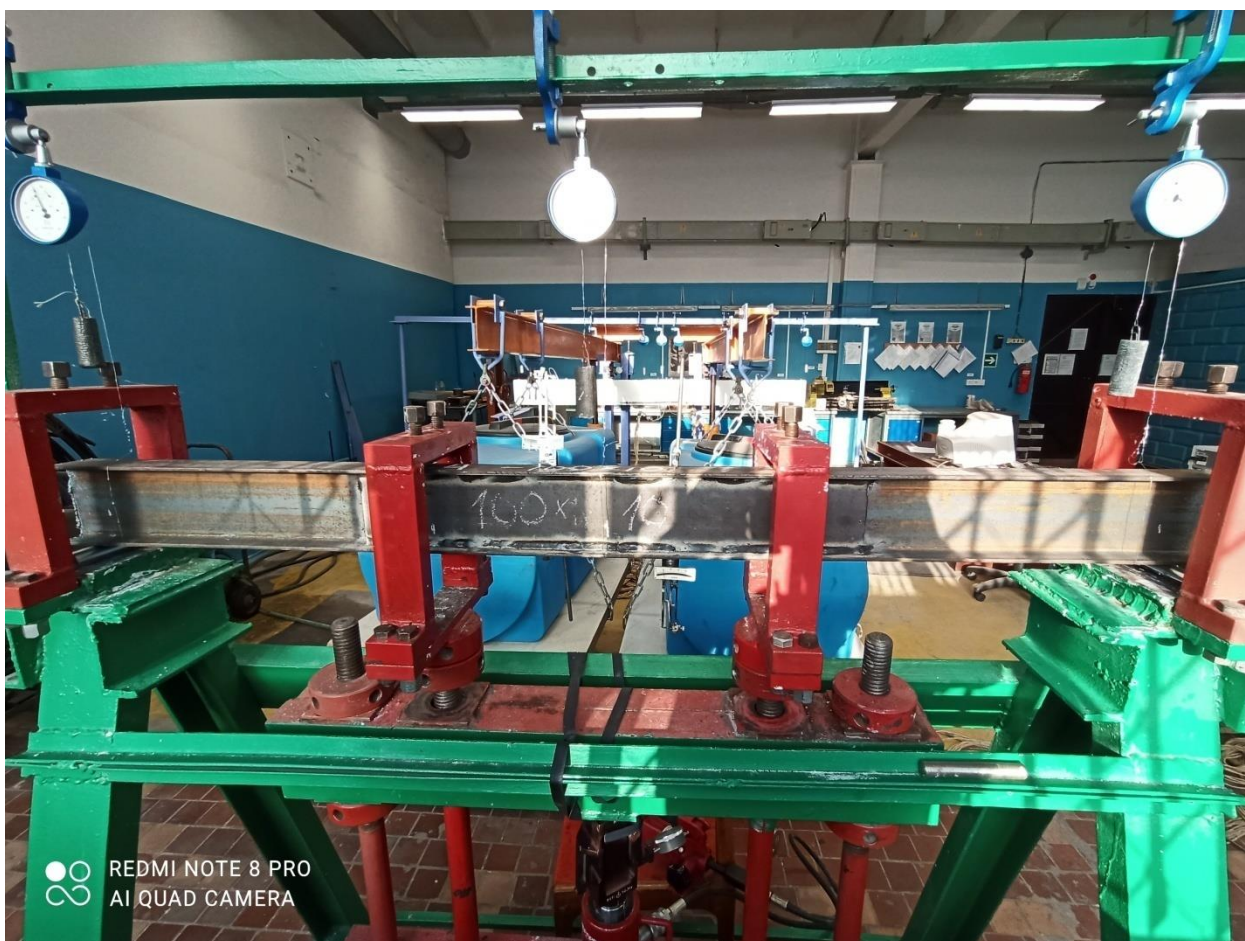


Рисунок 49– Испытание образца Б4, усиленного двумя полосами - 100x10 симметрично с двух сторон

Результаты испытания балки Б4 были отражены в таблице 8 и на рисунках 49-50.

Таблица 8 – Результаты испытания эталонной балки

Марка балки	Усиление	Пред. нагр., теоретич., тН	Пред. нагр., практич., тН	Прогиб, мм
Б4	-100x10 (2)	7,37	8,0	9,96

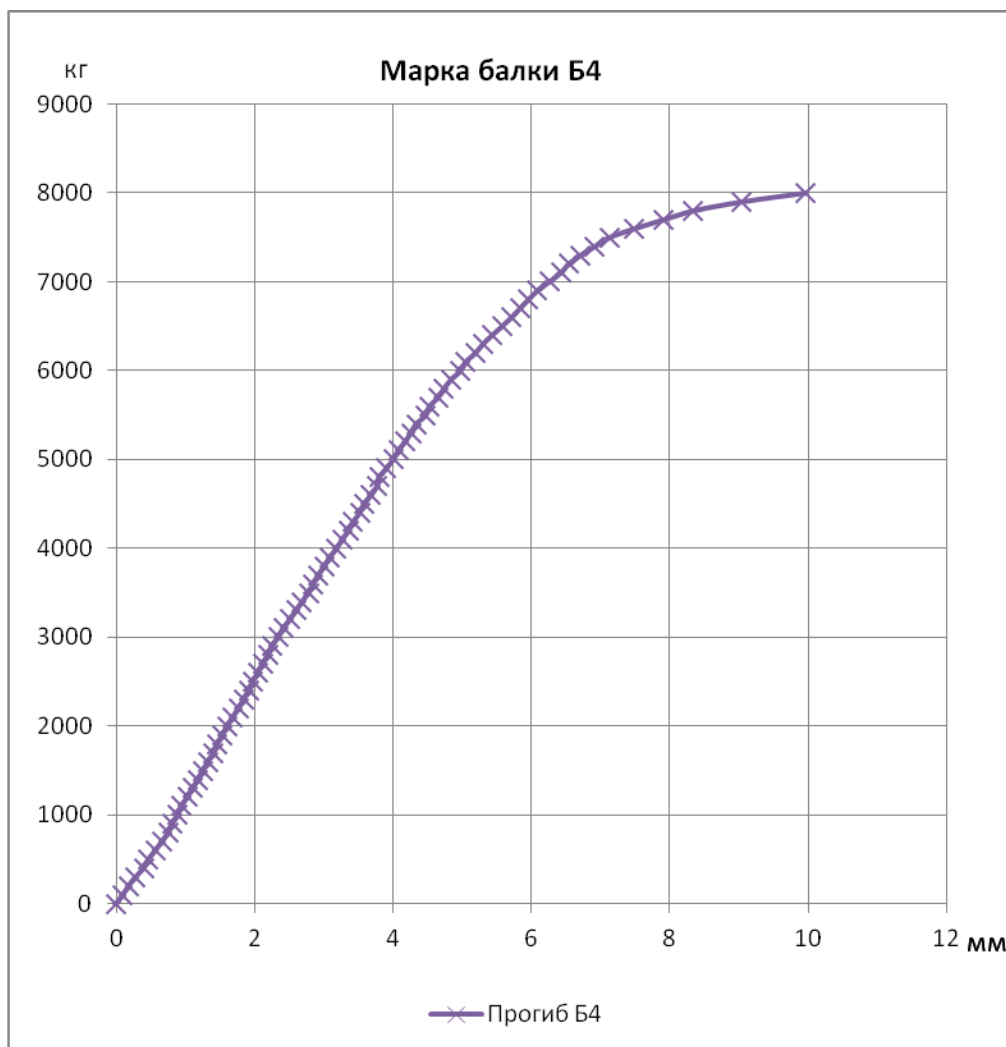


Рисунок 50 – Диаграмма прогиб - нагрузка образца Б4 (усиленного двумя полосами - 100x10 симметрично с двух сторон)

В результате проведенного испытания балки Б4 предельная нагрузка составила 8,0 тн, что выше предельной нагрузки образца Б1 (эталонного образца); это превышение составляет 2500 кг. Вид усиленной балки Б4 после испытания показан на рисунке 51.

При $\sigma_T=42,8$ в теоретических исследованиях образца Б4 максимальная нагрузка $P_{max}=73,7$ кН/см², что в свою очередь оказалась не на много меньше чем при практических испытаниях в которых $P_{max}=80$ кН/см².

Вывод: нагрузка при практическом испытании эталонного образца балки Б4 примерно совпадает с теоретическими расчетами, разница между теоретическим и практическим испытанием составляет менее 8%.



Рисунок 51 - Вид усиленной балки Б4 после испытания

3.6 Результаты испытания образца марки Б5, усиленного двумя уголками L 75x6, прикрепленными с двух сторон стенки симметрично



Рисунок 52– Прикрепление уголков L75x6 с двух сторон стенки симметрично образца балки Б5



Рисунок 53– Испытание образца Б5, усиленного двумя уголками L75x6 симметрично с двух сторон

Результаты испытания балки Б5 были отражены в таблице 9 и на рисунках 53-54.

Таблица 9 – Результаты испытания эталонной балки

Марка балки	Усиление	Пред. нагр., теоретич., тН	Пред. нагр., практич., тН	Прогиб, мм
Б5	L75x6 (2)	7,09	8,2	11,75

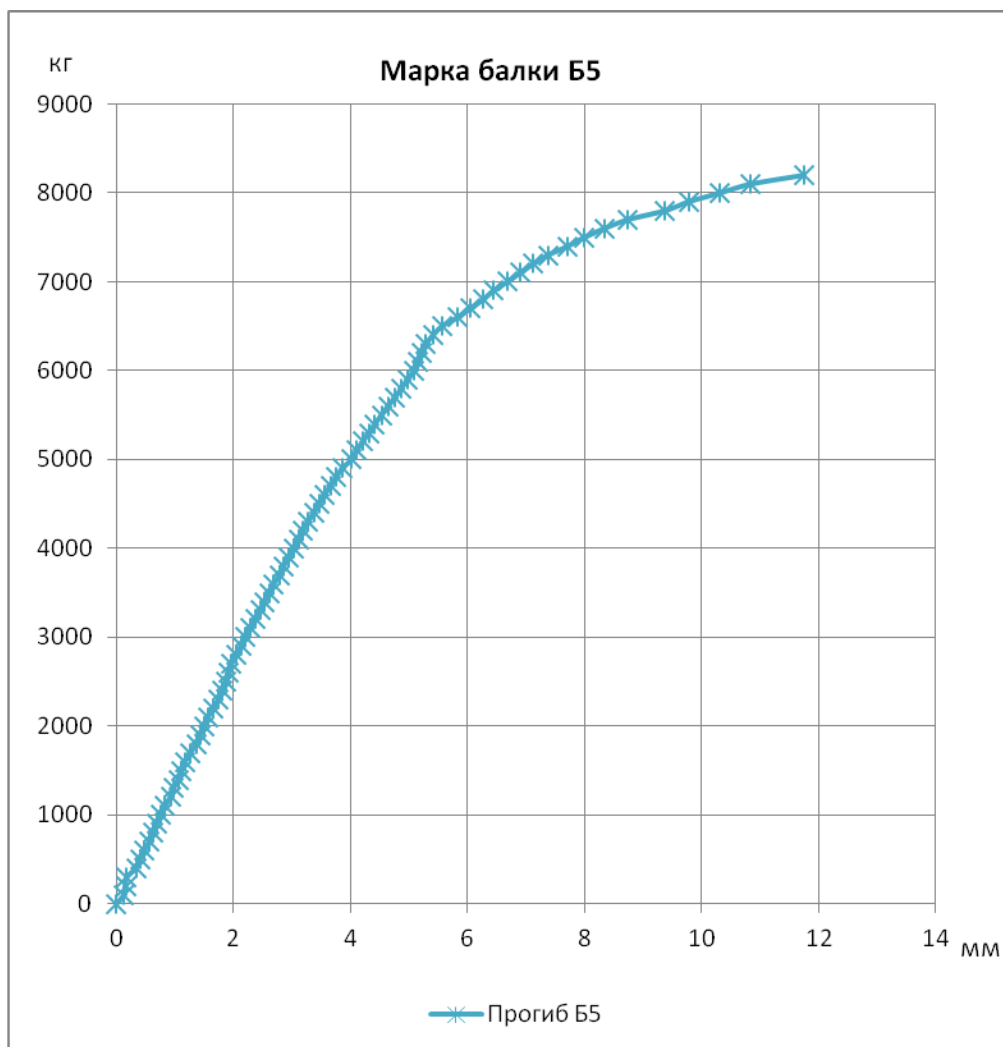


Рисунок 54 – Диаграмма прогиб - нагрузка образца Б5 (усиленного двумя уголками L75x6 симметрично с двух сторон)

В результате проведенного испытания балки Б5 предельная нагрузка составила 8,2 тн, что выше предельной нагрузки образца Б1 (эталонного образца); это превышение составляет 2700 кг. Вид усиленной балки Б5 после испытания показан на рисунке 55.

При $\sigma_T=42,8$ в теоретических исследованиях образца Б5 максимальная нагрузка $P_{max}=70,9$ кН/см², что в свою очередь оказалась меньше чем при практических испытаниях в которых $P_{max}=82,5$ кН/см².

Вывод: нагрузка при практическом испытании эталонного образца балки Б4 примерно совпадает с теоретическими расчетами, разница между теоретическим и практическим испытанием составляет менее 13%.



Рисунок 55 - Вид усиленной балки Б5 после испытания

Выводы по третьей главе

В результате проведенных испытаний получена информация о том, что наиболее эффективно проводить усиление балок, нагруженных по верхнему поясу, с помощью полос 100x10 и уголков 75x6 привариваемых симметрично с двух сторон стенки. Такое усиление повышает несущую способность балки:

- усиление образца Б4 двумя полосами 100x10 дало увеличение 47%;
- усиление образца Б5 двумя уголками L75x6 дало увеличение 49%.

Заключение

1) При грамотном усилении металлических конструкций можно получить необходимые показатели и подобрать максимально простую и эффективную схему выполнения производственных работ.

2) В процессе эксплуатации зданий и сооружений зачастую возникают ситуации, требующие усиления металлических балок и ригелей.

3) Определяющими показателями работы балочного элемента являются прочность и жесткость.

4) Благодаря грамотному проведению работ по усилению можно значительно сэкономить средства и увеличить срок службы конструкций.

5) В случае расположения плит на верхних поясах по технологическим причинам невозможно прикрепление к поясам элементов усиления.

6) В случае расположения плит на верхних поясах возможно несимметричное и симметричное усиление.

7) При усилении двутавров следует идти по пути увеличения жесткости при изгибе.

8) Несимметричное усиление недостаточно эффективно: увеличение несущей способности образца, усиленного полосой, прикрепленной к нижней полке составило порядка 16%.

9) Большее увеличение несущей способности даёт симметричное усиление, в частности:

– усиление образца двумя полосами 100x10, прикрепленными к стенке, дало увеличение 47%;

– усиление образца двумя уголками L75x6, прикрепленными к стенке, дало увеличение 49%.

10) При усилении балок некорректно определение ядрового расстояния, как характеристики рациональности сечения.

Список используемой литературы

1. Андрианов К.А. Расчёт усиления конструкций перед реконструкцией и капитальным ремонтом [Текст] : учебное пособие для очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению 270800 «Строительство» / К. А. Андрианов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Тамбовский гос. технический ун-т». - Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2012. - 112 с.
2. Андрианов К.А. Расчёт усиления конструкций перед реконструкцией и капитальным ремонтом : учебное пособие / К.А. Андрианов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 112 с. – 100 экз. – ISBN 8-978-5-8265-1104-6.
3. Бальдин Г. М., Таничева Н. В. Усиление строительных конструкций при реконструкции и капитальном ремонте зданий : учеб. пос. для вузов / – М.: Изд. АСВ. – 2008 – 112 с.
4. Бельский М.Р. Лебедев А.И. Усиление стальных конструкций. Киев: «Будівельник», 1981. –120 с.
5. Беляев Б. И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Беляев, Б. И., Корниенко, В. С. - М. : Стройиздат, 1968. - 206 с.
6. Валь В.П. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции / В.П. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров. – М. :Стройиздат, 1987. – 220 с.
7. 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.
8. ГОСТ 23118-2012. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия.
9. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

10. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния
11. ГОСТ 8239-89 Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.
12. ГОСТ Р 57837-2017 Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия
13. ГОСТ Р 58904-2020/ISO/TR 25901-1:2016 Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Общие термины
14. Гроздов В. Т. Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений. - СПб, 2005. – 114 с.
15. Демидов Н.Н. Усиление стальных конструкций: учебное пособие / Демидов Н.Н.– Электрон. текстовые данные. – М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. 85 с.
16. Десятов Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСИ, 1969. –24 с.
17. Дмитриев Ф.Д. Крушение инженерных сооружений / Дмитриев Ф.Д. –М. : Стройиздат, 1953. – 140 с.
18. Ибрагимов А.М. Сварка строительных металлических конструкций: Учебное пособие / А.М. Ибрагимов, В.С. Парлашкевич - М. : Издательство АСВ, 2015.
19. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление восстановление и ремонт / Иванов Ю.В. – М. : АСВ, 2012. – 312 с.
20. Колотов О.В. Металлические конструкции: учебное пособие. / О.В. Колотов.– Н. Новгород: ННГАСУ, 2010. – 100 с.
21. Лучкин Р.С. Коррозия и защита металлических материалов (структурные и химические факторы): электронное пособие Р.С. Лучкин. - Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017.– 269 с.– Режим доступа: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/6067/1/%D0%9B%D1%83%D1%87%D0%BA%D0%B8%D0%BD%201-109-15-ei-Z.pdf> (дата обращения: 01.03.21)

22. Мамченко В.О. Расчет балок на прочность и жесткость при прямом плоском изгибе: Учебно-методическое пособие. - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014.- 48 с.

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: 01.03.21)

24. 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).

25. Металлические конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов / Г.С. Ведеников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева и др.; Под ред. Г.С. Веденикова. - 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1998. - 760 с.

26. Металлические конструкции: Учебник/ Ю. И. Кудишин [и др.] ; ред., Ю. И. Кудишин. - 11-е изд., стер. - Москва : Академия, 2008. - 688 с.

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

28. Москалев Н.С., Пронозин Я.А. Металлические конструкции. Учебник / М: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 344 с.

29. Назаров С.Т. Методы контроля качества сварных соединений. -М.: Машиностроение, 1964. – 227 с.

30. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23–81*) / УкрНИИпроектстальконструкция. – М. :Стройиздат, 1989. – 159 с.

31. РД 34.15.132-96 Сварка и контроль качества сварных соединений металлоконструкций зданий при сооружении промышленных объектов

32. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений/НИИСК— М : Стройиздат, 1989.– 104 с.

33. Рекомендации по усилению стальных конструкций производственных зданий и сооружений энергопредприятий, Составители В.А.Колесник, В.В.Буланов, В.Д.Кузнецов, Р.Р.Турбабина, Г.Б.Ярославцева, И.А.Стрепкова, 1987 г. Режим доступа: https://mega.nz/file/m4snXRYA#bPq3TSCV6iVBHuYH1MBXSO2a7SoFPLyJXb_e3-rEq04 (дата обращения: 10.03.21)

34. Рекомендации по усилению стальных конструкций производственных зданий и сооружений энергопредприятий.

35. РТМ 1652-9-89 Руководство по инженерно-техническому обследованию, оценке качества и надежности строительных конструкций зданий и сооружений. / Министерство химического и нефтяного машиностроения СССР; Проектнииспецхиммаш. - М., 1990

36. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – введ. 28.08.2017. – Москва: Минстрой России, 2017. – 140 с.

37. 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)

38. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями N 1, 2)

39. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87

40. Установка для испытания балочных конструкций Ерышев В.А., Колганов Ю.А., Горшенина Е.В. Патент на изобретение RU2262698C1, 20.10.2005. Заявка № 2004120086/28 от 01.07.2004

41. Cold-formed steel design / Wei-Wen Yu, Roger A. LaBoube, Helen Chen. – 5th ed / Published by John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ 07030, USA, 2020, - 515 с–Режимдоступа: <https://www.wiley.com>

https://mirlib.ru/knigi/design_i_arhitektura/387618-cold-formed-steel-design-5th-edition.html (датаобращения: 12.11.20)

42. Corrosion Inspection and Monitoring, Pierre R. Roberge / Published by John Wiley & Sons, Inc, 2007, 387 p –Режимдоступа: https://mirlib.ru/knigi/tehnicheskie_nauki/293655-corrosion-inspection-and-monitoring.html (датаобращения: 21.01.21)

43. Steel designers' manual / the Steel Construction Institute ; edited by Buick Davison, Graham W. Owens.. - 7th ed. 2012 –Режимдоступа: <https://dwg.ru/dnl/12218> (датаобращения: 21.06.20)

44. Strengthening Techniques of Steel Structure: An Overview Md. Mofizul Islam, Rubieyat Bin Ali, Moushtakim Billah Department of Civil Engineering, Bangladesh University of Engineering & Technology, Dhaka - 1000, Bangladesh, January 2019, - 13 p –Режимдоступа: (<http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2018/11/WSN-118-2019-181-193.pdf>) (датаобращения: 01.10.20)

45. Strengthening Techniques: Code-Deficient Steel Buildings, Konstantinos Daniel Tsavdaridis / Published In book: Encyclopedia of Earthquake Engineering, August 2015, - 26 p, –Режимдоступа: https://www.researchgate.net/publication/266851226_Strengthening_Techniques_Code-Deficient_Steel_Buildings (датаобращения: 10.12.20)