

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
В.И. Темных  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**Направление** 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов  
**Профиль** 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов в  
машиностроении

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КРУПНОГО МОСТОСТРОЕНИЯ

Научный руководитель

В.И. Темных  
(подпись, дата)

Выпускник

20.06.16 К.И. Клесова  
(подпись, дата)

Нормоконтроль

20.06.16 Л.А. Свечникова  
(подпись, дата)

Красноярск 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Современные тенденции в отечественном мостостроении. Новые материалы и технологии.....	6
1.2 Современные тенденции в зарубежном мостостроении. Новые технологии .....	9
2 Технические условия на производство балок и ортотропных плит ...	12
2.1 Типовые схемы изготовления сварных балок, способы сварки и приспособления.....	16
2.2 Технические условия на сварочные материалы .....	18
2.3 Технические условия на сборку и сварку.....	20
2.4 Изготовление ребер жесткости.....	22
2.5 Сборка балки .....	23
2.6 Сборка-сварка ребер жесткости элементов с элементами балок и ортотропных плит .....	24
3 Основные требования по конструкционной прочности для стальных мостовых балочных конструкций.....	26
3.1 Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки.	27
4 Выбор перспективных строительных сталей повышенной прочности для крупного мостостроения.....	31
4.1 Анализ основных возможных металлических материалов .....	31
4.2 Рекомендации по основным конструкционным металлическим материалам для крупного мостостроения.....	45
4.3 Опыт практического мостостроения.....	46
5 Техничко-экономический анализ .....	49
6 Список используемых источников.....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	56

## ВВЕДЕНИЕ

Россия – один из лидеров мирового стального мостостроения. Большая часть мостовых объектов у нас производится в виде стальных пролётных строений.

Сварочное производство в стальном мостостроении России – это основополагающий технологический процесс, как при изготовлении отдельных элементов пролётных строений на заводах России, так и при монтажной сборке и сварке заводских отправочных марок в конкретные пролётные строения на стройплощадках. Именно на сварные соединения приходится более 80% от общего объёма заводских и монтажных соединений.

Как правило, мосты состоят из пролётных строений и опор. Пролётные строения служат для восприятия нагрузок и передачи их опорам; на них может располагаться проезжая часть, пешеходный переход, трубопровод. Опоры переносят нагрузки с пролётных строений на основание моста. Пролётные строения состоят из несущих конструкций: балок, ферм, диафрагм (поперечных балок) и собственно плиты проезжей части.

Пролётные строения поддерживаются опорами, каждая из которых состоит из фундамента и опорной части. Формы опор могут быть весьма разнообразными. Промежуточные опоры называются быками, береговые – устоями. Устои служат для соединения моста с подходными насыпями.

Перечень конструкционных мостостроительных материалов достаточно широк. Задача настоящего проекта состоит в обоснованном выборе основных металлических сплавов для строительства крупных мостов, отвечающим эксплуатационным, технологическим и экономическим требованиям.

## **1 Современные тенденции в отечественном мостостроении. Новые материалы и технологии**

Мостостроение – одна из самых развитых сфер транспортного строительства России, что закономерно. В стране насчитывается около 100000 мостов, в том числе 30000 – железнодорожных. Многие являются уникальными техническими сооружениями [1, 2].

Сложность строительства моста заключается в том, что его конструкции и технологии их производства взаимосвязаны. Изменение конструкций влечет за собой необходимость совершенствования технологий, совершенствование технологии способствует появлению новых конструкционных решений[2].

В металлических мостах пролетные строения изготавливают из металла, а опоры – из бетона или железобетона.

Изобретение в 1897 году железобетонных свай побудило инженеров к разработке копрового оборудования, погружающегося в грунт тяжелые длинномерные элементы [3].

Развитие технологии позволило увеличить размеры свай, т.е. усовершенствовать конструкцию опор. Металлические сплавы – наиболее совершенные материалы для строительных конструкций. Благодаря повышенной прочности строительных сталей стальными пролетными строениями можно перекрывать большие пролеты, чем железобетонными. Современные стальные мосты имеют пролеты, превышающие 1–2 км [1].

Стальные пролетные строения по статической системе могут быть балочными, арочными, рамными, висячими и комбинированными, по расположению уровня проезда – с ездой поверху, посередине и понизу, а в конструктивном отношении – со сплошными главными несущими конструкциями (балками, рамами) и со сквозными (решетчатыми)[2].

Наиболее широкое применение получили балочные пролетные строения. Находят применение пролетные строения, у которых стальные главные балки несущей конструкции объединены с железобетонной плитой для совместной

работы под нагрузкой. Такие объединенные конструкции еще называют стале-железобетонными [3].

При сооружении мостов с металлическими пролетными строениями чаще всего применяют такие технологии:

- Сборка пролетных строений на сплошных подмостях или насыпи.
- Монтаж методом продольной надвижки.
- Монтаж с доставкой пролетных строений на плавучих опорах.
- Навесной монтаж пролетных строений.
- Монтаж стреловыми и специальными кранами.

Выбор технологии определяется местными условиями и требует обоснования [4,5].

Металлические пролетные строения обладают рядом преимуществ по сравнению с пролетными строениями из других материалов:

- 1 Высокая индустриальность изготовления конструкций на заводах.
- 2 Удобство монтажа конструкций, который можно выполнять независимо от времени года с применением навесной и полунавесной сборки.
- 3 Возможность перекрытия больших пролетов при сравнительно небольшом собственном весе конструкции.
- 4 Наиболее благоприятные возможности восстановления конструкции в случаях их повреждения.
- 5 Относительная простота усиления конструкции в необходимости.

Основными недостатками металлических пролетных строений являются высокий расход прокатного металла, большие эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью периодической окраски конструкции, и относительно меньшая долговечность по сравнению с железобетонными пролетными строениями [20].

Ключевыми требованиями, предъявляемыми к мостам, являются безопасность и комфортность проезда, высокая эксплуатационная надежность сооружений, включающая достаточную грузоподъемность и долговечность, а также максимальная эффективность затрат на содержание, реконструкцию и ремонт

мостовых сооружений. Также к мостам предъявляются и эстетические требования, так как нередко они становятся достопримечательностью и символом территории[3, 4].

Материалом для мостов служит сталь строительного типа с гарантируемыми механическими свойствами в состоянии поставки. Легированные стали, наиболее часто применяемые для строительных работ, содержат небольшие примеси кремния, никеля и меди. Добавление этих элементов, повышающих предел прочности и предел упругости стали, дает возможность использовать при проектировании повышенные допускаемые напряжения, что приводит к соответствующему уменьшению постоянной нагрузки[1, 2].

Цена легированных сталей и стоимость их обработки несколько выше, чем обычных углеродистых сталей; их применение оказывается выгодным лишь при больших пролетах, когда собственный вес составляет значительную часть общей величины нагрузки[3].

Государство заинтересованно во введении инноваций в строительство мостов, правда результаты пока незначительные и внедрить инновации стало гораздо сложнее, но уже в данное время разрабатываются дополнения к правилам, которые предусматривают использование композитных материалов.

Уже сегодня накопился опыт строительства мостов с использованием алюминиевых сплавов. Их применяют в строительстве разводных мостов, парапетов, средних пролетов пешеходных мостов, проезда автодорожных мостов, гофрированных труб, различных порталов над проезжей частью.

Алюминиевые сплавы обладают целым рядом достоинств, которые позволяют его применение в строительстве мостов. Однако также есть и достаточное количество негативных характеристик[22].

Сплавы алюминия намного легче стали, обладает достаточно высокой удельной прочностью, не подвержены коррозии, не требуют окраски для защиты элементов моста от воздействия природных и химических реагентов. Алюминий и его сплавы легко переносят сверхнизкие температуры, прессуются, позволяя получить профиль любой формы[22].

В это же время этот металл не используется широко в мостостроительстве по причинам его малого значения модуля упругости, высокого линейного расширения, необходимости дополнительной охраны конструкции (цветные металлы привлекают грабителей).

Немецкая компания PML (PeterMaierLeichtbauGmbH), специализирующаяся на производстве металлоконструкций, намерена разместить производственную площадку на территории Красноярского края. Информацию об этом подтвердили в региональном правительстве.

PML предлагает внедрить на территории региона новую технологию создания мостов, трапов и лестниц из особо прочных алюминиевых сплавов, которые превосходят традиционные железобетонные конструкции по многим параметрам. Так, в числе преимуществ таких конструкций – быстровозводимость, низкая масса, продолжительный срок эксплуатации, экологичность материала, эстетическая привлекательность [21].

Мосты и лестницы из алюминия могут быть использованы при строительстве объектов Универсиады и создании пешеходной инфраструктуры городов края [21].

## **1.2 Современные тенденции в зарубежном мостостроении. Новые технологии**

В Германии и других странах Европы широко применяется технология циклической продольной надвигки (ЦПН), которая позволяет возводить высококачественные мостовые сооружения над автомобильными магистралями или железнодорожными путями без перерывов в движении транспорта, в сложной пересечённой местности. Технология ЦПН обеспечивает высокую экономическую эффективность при сооружении неразрезных пролётных строений большой протяженности.

Преимущество метода циклической надвигки состоит в том, что небольшая бригада человек возводит участок пролётного строения (15–20 м) за короткие

сроки [12, 17]. А также важным преимуществом этой технологии является концентрация всего процесса изготовления пролётного строения на берегу, сопоставимая с заводскими условиями.

При сооружении восьми виадуков на автодороге между Мадридом и Севильей (Испания) фирмой «Стронгхалд» была применена технология продольно-циклической надвигки пролетных строений (рис. 1.2).

Классическая схема цикла сооружения пролетного строения представлена на примере блоков коробчатого сечения (УЦН – установка циклической надвигки) – как наиболее целесообразных для метода ЦПН (рис. 1.3).

На промежуточных опорах при надвигке устанавливали опорные части стаканного типа, которые играли двойную роль:

1 При надвигке по ним происходило скольжение железобетонного пролетного строения.

2 После надвигки опорные части оставались под пролетным строением как постоянные. На постоянную опорную часть стаканного типа устанавливались временные скользуны (типа салазок) [17].

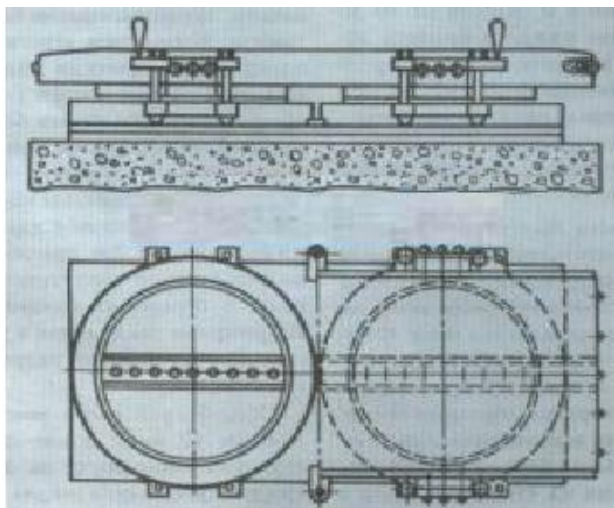


Рисунок 1.2 –Опорные части двойного назначения



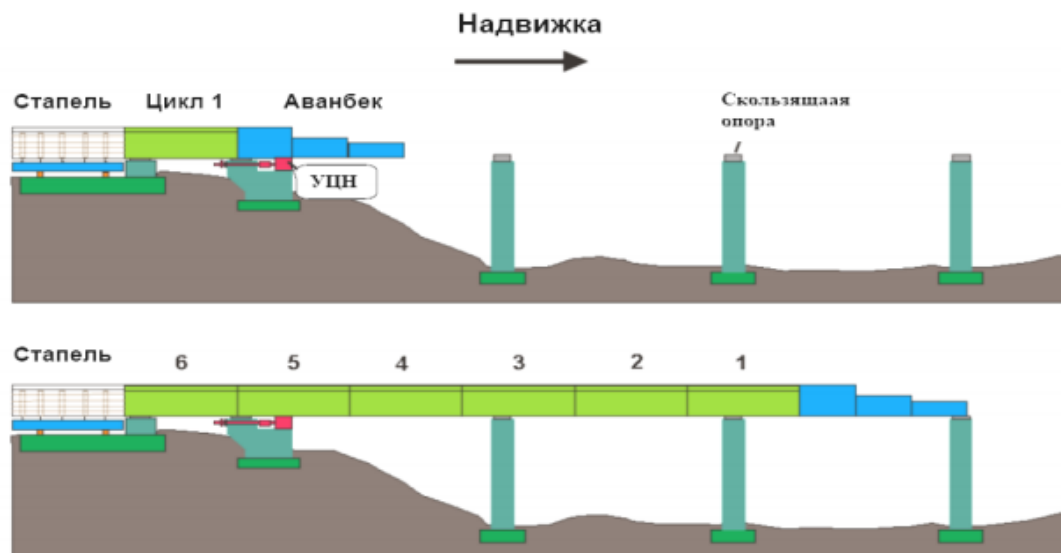


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема ЦПН

Необычный мост для любителей пощекотать нервы растянулся между двумя горными вершинами над китайской долиной Пиньян на высоте 180 метров над землей. Трехслойный уровень пола, который выполнен из стекла, выдерживает диапазон температур в 60 °С и ветер скоростью до 220 километров в час [22].

Строители заявили, что стеклянное покрытие моста прошло около 100 испытаний на безопасность [22].

Мировая практика строительства мостов наглядно показывает тенденцию постоянного совершенствования используемых технологий и материалов.

## 2 Технические условия на производство балок и ортотропных плит

Как правило, мост может состоять как из одной, так и из нескольких пролетных строений, соединенных между собой.

В стальных пролетных строениях балки, перекрывающие опоры между пролетами, являются основными несущими элементами. Для обеспечения пространственной жесткости главные балки соединяют между собой ортотропной плитой проезжей части, поперечными связями, располагаемыми вдоль моста с определённым шагом, и нижними продольными связями крестовой системы. Одноярусная ортотропная плита проезжей части состоит из листа настила, продольных рёбер полосового сечения, расположенных поперёк моста и поперечных балок таврового сечения, расположенных вдоль моста. Листы настила блоков ортотропных плит имеют по длине технологические припуски, обрезаемые на монтаже, также имеются припуски по ширине блоков ортотропных плит в местах сопряжения с главными балками. Основная масса металлоконструкций приходится на балки и ортотропные плиты [23].

Балки могут иметь не постоянное поперечное сечения по длине за счет изменения толщины и ширины нижнего пояса. Изменение площади поперечного сечения балки производится в целях экономии материала и направлено для получения равнопрочной конструкции [24].

Заводские соединения элементов пролётного строения осуществляются методом сварки. Монтажные соединения: сварные – стыки листов настила ортотропных плит между собой и с поясами главных балок, стыки поясов главных балок; фрикционные на высокопрочных болтах – стыки вертикальных стенок главных балок, стыки продольных рёбер ортотропных плит, соединение поперечных балок ортотропных плит между собой и с главными балками, соединение поперечных связей с главными балками [24].

Несущие балки имеют коробчатое либо двутавровое сечение и их элементы (стенка и пояса) при работе испытывают совместное действие нормальных и касательных напряжений, которые могут приводить к потере устойчивости как

всего сечения так и отдельных его элементов. Потеря устойчивости одним из элементов балки полностью или частично выводит его из работы, рабочее сечение балки уменьшается, часто становится не симметричным, центр изгиба смещается, и это приводит к преждевременной потере несущей способности всей балки.

В качестве примера можно взять мост через реку Юрубчен, Северо-Енисейский район, построенного в 2011 году.

ООО «Восточно-Сибирский завод металлоконструкций», город Назарово, изготавливал металлоконструкции мостового перехода для данного моста.

Общий вид блока моста показан на рисунке 2.1. Блок моста, в свою очередь, состоит из главных (несущих) балок, соединенных с помощью ортотропных плит. Общий вид балки и ортотропной плиты также показан на рисунке 2.2 и 2.3 соответственно.

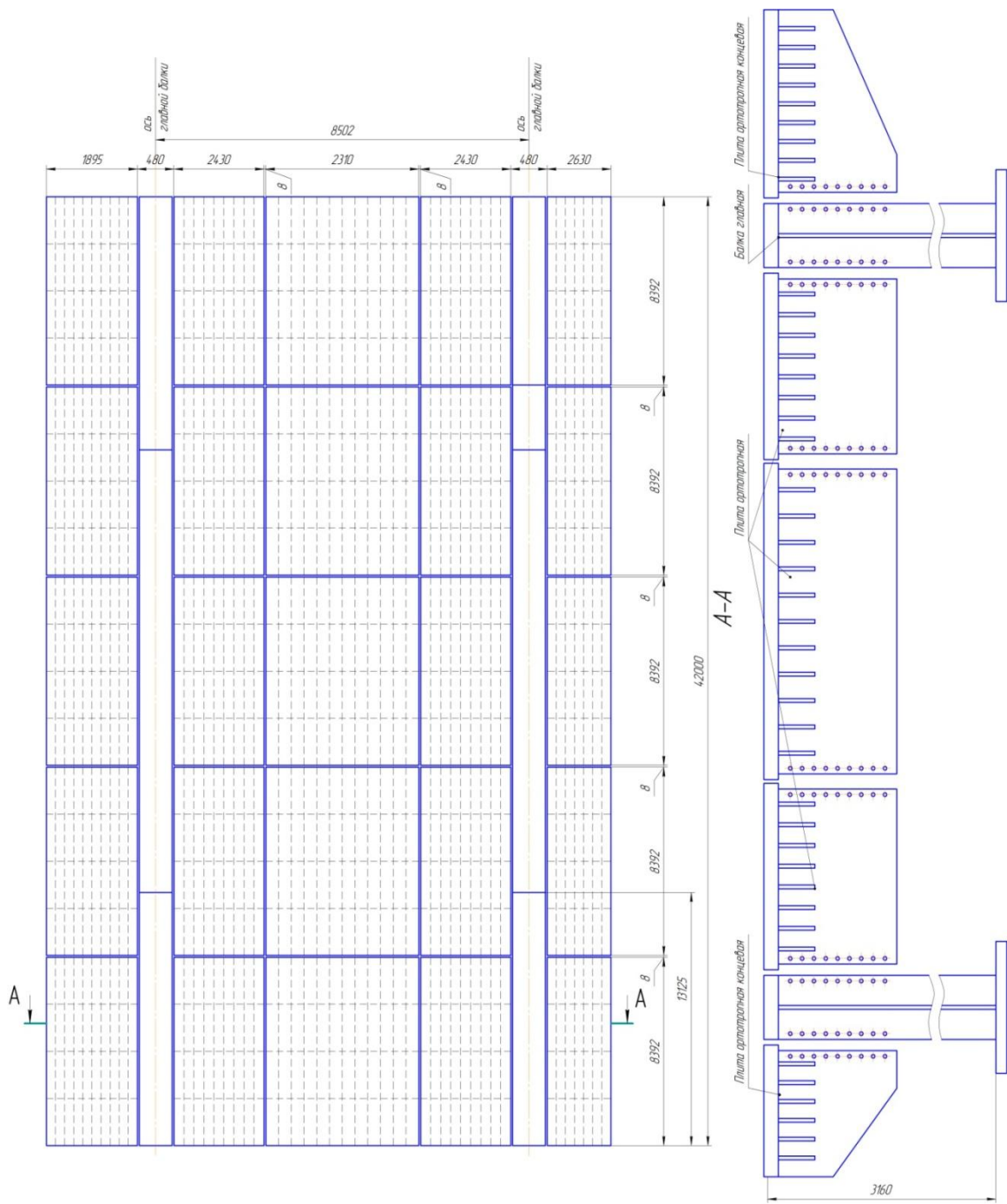


Рисунок 2.1 –Чертеж блока моста

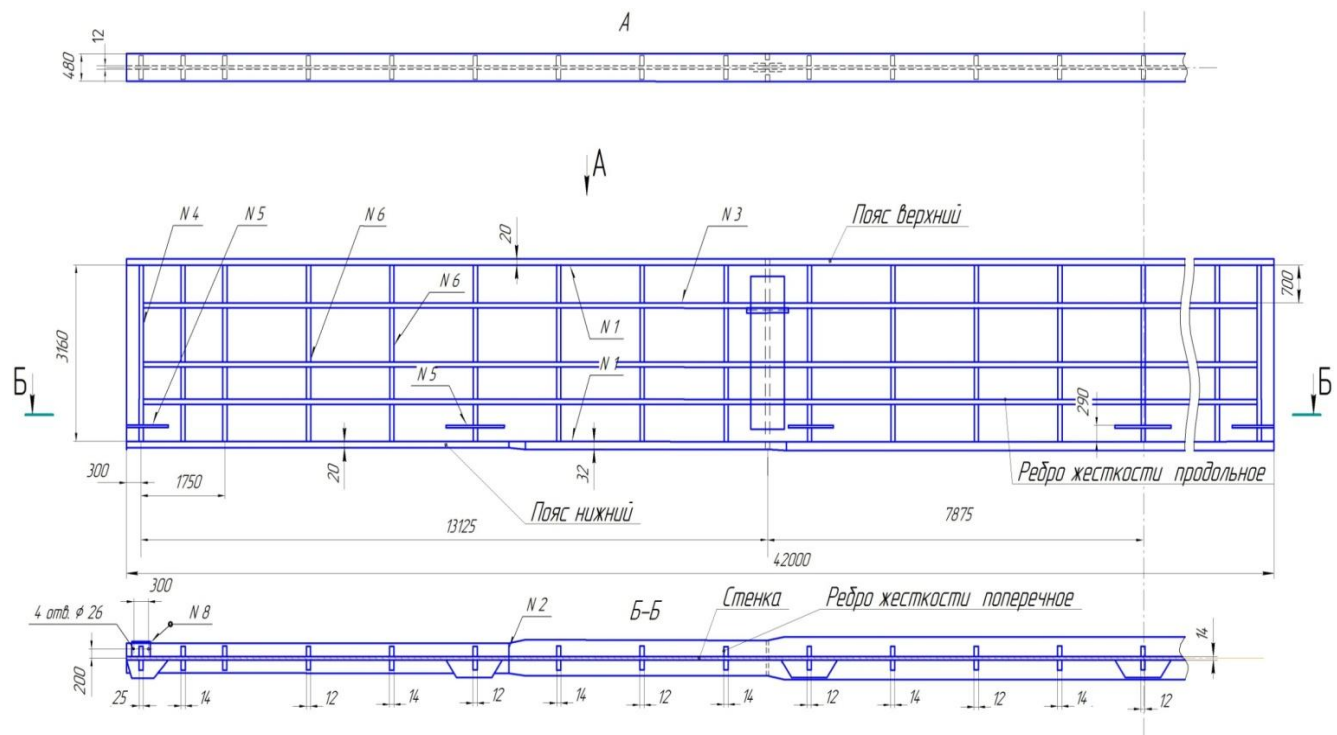


Рисунок 2.2 – Чертеж балки главной

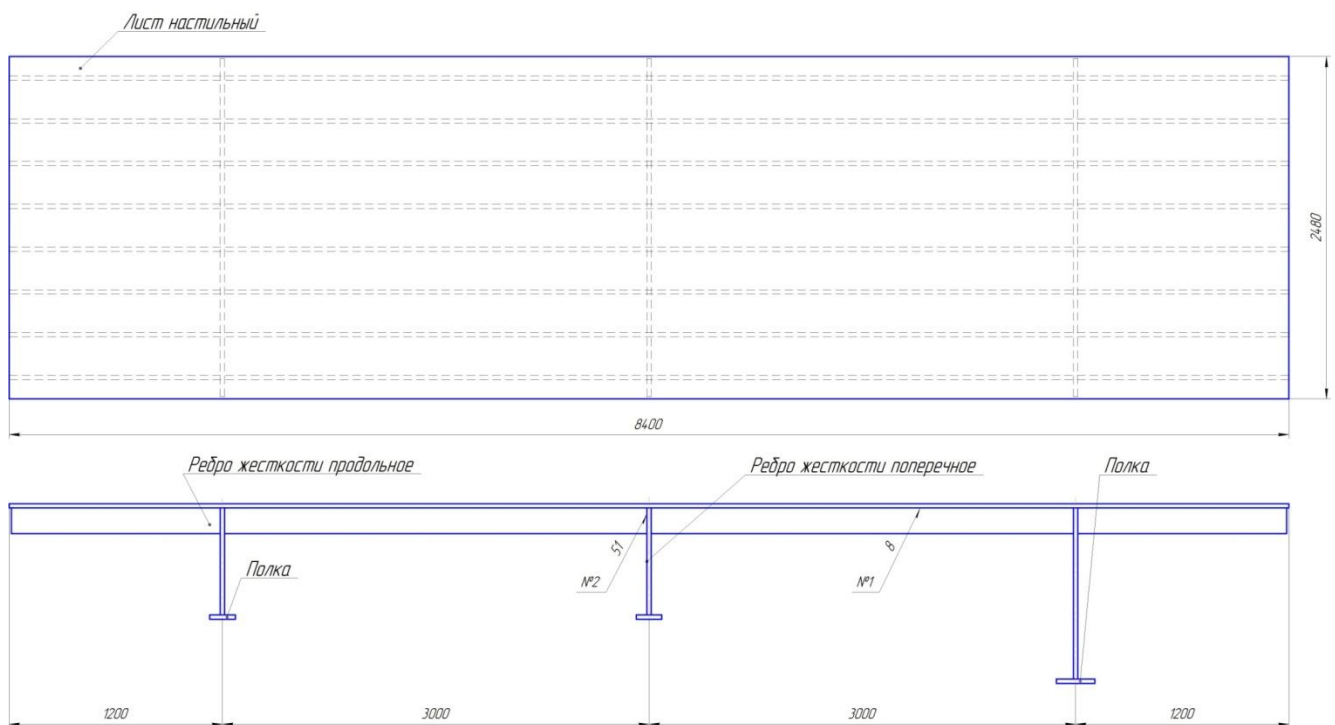


Рисунок 2.3 – Чертеж плиты ортотропной

Для предотвращения потери устойчивости сечения можно пойти двумя путями: либо увеличить толщину элементов балки, либо за счет укрепления балки специальными ребрами жесткости, расположенными нормально к поверхности листа.

Наиболее рациональным является выбор второго варианта, так как из-за больших размеров элементов балки увеличение их толщины привело бы к большому перерасходу материалов.

В главных балках пролетных строений предусмотрена система поперечных и продольных ребер жесткости. По СТО 012-2007 рекомендуется устанавливать непрерывными продольные ребра жесткости, прерывая поперечные [25]. Если же продольные ребра прерываются, то их присоединение к поперечным должно быть выполнено с полным проваром сечения ребра.

## **2.1 Типовые схемы изготовления сварных балок, способы сварки и приспособления**

Широкое применение имеют двутавровый и коробчатый профили с поясными швами, выполняемыми обычно автоматами под флюсом [6].

Исходя из этого и определяется оптимальная схема изготовления сварной балки.

Обычно двутавр собирают из трех листовых элементов, а коробчатый профиль – из четырех. При их заготовке, помимо правки, резки и зачистки кромок, часто предусматривают сборочную и сварочную операции для получения листового элемента требуемой длины и ширины. В этом случае к стыковым соединениям предъявляется требование полного и надежного проплавления с хорошим формированием усиления и проплава шва. Поэтому сварка, как правило, производится с двух сторон. Первый слой целесообразно сваривать на флюсовой подушке. В этом случае требования к точности сборки менее жестки, чем при сборке под сварку первого слоя на весу.

Сборка балки должна быть достаточно точной; особое внимание уделяется симметрии расположения и взаимной перпендикулярности полки и стенки. Использование приспособлений позволяет повысить производительность сборочных операций на 30–35 %. Распространены кондуктора с различными типами прижимов: пневматических, реже винтовых и эксцентриковых [24].

Помимо рассмотренных кондукторов, предусматривающих зажатие собираемых элементов по всей длине, используют установки с самоходным порталом [25].

Наличие или отсутствие ребер жесткости определяется размерами балки и характером ее нагружения. Обычно вертикальные ребра жесткости устанавливаются и привариваются после сварки поясных швов.

В тех случаях, когда балка имеет большую высоту (например, при сборке элементов мостовых пролетных строений), ее стенка может состояться по ширине из нескольких продольных листов. Эти листы или сваривают встык, или с помощью горизонтальных ребер жесткости угловыми швами втавр.

При изготовлении балок основной сварочной операцией является выполнение поясных швов, свариваемых автоматами под слоем флюса (головками типа АБСК или тракторами типа ТС). Используется флюс марки АН-47 [10].

Приемы и последовательность наложения швов могут быть различными. Наиболее распространенные приемы: в лодочку и наклоненным электродом. [11] Выполнение швов «в лодочку» обеспечивает лучшие условия их формирования и проплавления, зато поворачивать изделие приходится после сварки каждого шва. Для этого используют позиционеры-кантователи: универсальные, центровые, с кольцами, с жесткой рамой, цепные и др. [10,24].

Саму сварку также можно вести различными способами. Помимо традиционных, применяется сварка двумя проволоками малого диаметра, расположенными последовательно одна за другой с небольшим расстоянием между ними и работающими на общую удлиненную сварочную ванну [12].

В общем, схема изготовления сварной балки для мостостроения определяется в основном имеющимся на заводе-изготовителе оборудованием. Тем более что для изготовления крупногабаритных балок нужно соответствующее оборудование. И их производство получается единичным со всеми вытекающими из этого затратами.

Кроме этого на заводе-изготовителе должно иметься оборудование для комплексного подхода не только к самому процессу сварке, но также для устранения особенностей вносимых сваркой, например – правке полок.

Сварные балки больших размеров используются в пролетных строениях со сплошной стенкой. При изготовлении сварных мостов особое внимание уделяется качеству выполнения сварных соединений и мероприятиям по предотвращению и устранению концентрации напряжений. Поэтому автоматическая сварка используется не только при выполнении отдельных балок пролетного строения, но и при выполнении стыков балок на монтаже.

Несмотря на отличное качество таких соединений, проблему монтажа цельносварных пролетных строений еще нельзя считать окончательно решенной. В результате такие экономически выгодные методы монтажа, как навесная и полунавесная сборка, не могут быть применены, и цельносварные пролетные строения приходится собирать или на временных опорах, устанавливаемых под всеми монтажными стыками, или на подходе к мосту с последующей продольной движкой [6].

В связи с желанием автоматизировать такую операцию, как приварка продольных и поперечных ребер балок была придумана аппаратура для одновременной, двухсторонней сварки угловых швов на продольных и поперечных ребрах балок. Двухсторонняя сварка порошковой проволокой с применением аппаратов AD-82 повышает эффективность сварочного процесса и снижает ввод тепла в ребра. Качество швов повышается при одновременном улучшении защиты зоны сварки и занижении трудоемкости зачистки сварных изделий от брызг и шлака [13].

## **2.2 Технические условия на сварочные материалы**

Металлоконструкции пролетных строений железнодорожных, автотранспортных, пешеходных и комбинированных мостов должны проектироваться и



изготавливаться в соответствии с требованиями СТО 012-2007 «Стандарт организации, заводское изготовление стальных конструкций мостов» [24].

Сварочные материалы следует выбирать с учетом класса прочности и марки применяемой стали, способа сварки, типа сварного соединения и исполнения конструкции (обычного или северного).

Качество сплошной холоднотянутой сварочной проволоки должно соответствовать требованиям ГОСТ 2246-70. Поверхность проволоки перед намоткой в кассеты необходимо очищать от ржавчины, жиров, технологической смазки и других загрязнений посредством пропуска через специальные устройства. Проволоку перед очисткой рекомендуется прокалить в печи при температуре 150–200°C в течение 1,5–2 ч [25].

Для автоматической сварки стыковых соединений и угловых швов в положении "в лодочку" рекомендуется применять сварочную проволоку диаметром 4 и 5 мм. Для автоматической сварки угловых швов в положении "в угол" и полуавтоматической сварки любых соединений рекомендуется проволока диаметром 1,6–2 мм (возможно применение проволоки и меньшего диаметра для угловых швов с катетом 4–5 мм).

Флюсы должны поставляться по ГОСТ 9087-81 или ТУ заводоизготовителей (при условии, что качество поставляемых по ТУ флюсов отвечает требованиям ГОСТ 9087), храниться в упаковке поставщика в сухом отапливаемом помещении или в специальной закрытой таре [26].

Перед употреблением флюсы прокаливают по режимам, указанным в сертификатах или ТУ заводоизготовителей. После прокалики флюсы хранят в сушильных шкафах при температуре 80–100 °С. На рабочее место флюс следует подавать в количестве, необходимом для работы в течение одной смены.

При выборе источников питания сварочной дуги и оборудования для сварочных работ надлежит руководствоваться в первую очередь необходимостью обеспечения стабильных режимов сварки с заданными параметрами, гарантирующими высокое качество сварных соединений. Кратковременные отклонения от установленного режима сварки не должны превышать:

- по силе тока 5%;
- по напряжению на дуге 2 В;
- по скорости сварки 10 %.

Для всех способов сварки мостовых конструкций следует применять источники питания дуги постоянного тока (выпрямители или преобразователи). Сварочные автоматы и полуавтоматы следует подбирать в зависимости от способов сварки, типов сварных соединений и конкретных условий производства сварочных работ [26].

### 2.3 Технические условия на сборку и сварку

Технические условия на сборку:

1 При сборке полотнищ под стыковую автоматическую сварку под флюсом на флюсовой подушке зазоры  $b$  в стыках для проката толщиной 10–16 мм из сталей по ГОСТ6713-91 должны быть в пределах 0–3 мм; из сталей по ТУ 14-1-5120-92 – в зависимости от толщины листа  $S$  [29], таблица 2.1;

Таблица 2.1 – технические условия на сборку

$S$ , мм	10–12	14–16
$b$ , мм	1–3	2–4

Смещение осей полок и стенки не должно превышать 2 мм.

2 Неперпендикулярность полки не более 1 мм.

3 Отклонения высоты стенки в зоне монтажных стыков не более 2 мм, в остальных случаях 4 мм.

4 Грибовидность в зоне монтажных стыков не более 2 мм, в остальных случаях не более 4 мм.

5 Выпучивание стенок не более 3 мм.

6 Все неровности и местные уступы, имеющиеся на деталях и препятствующие правильной сборке конструкций, подлежит до сборки устранять по-

вторной правкой или зачисткой абразивным инструментом. При зазорах, превышающих 2 мм, но не более 3 мм на длине до 500 мм, допускается предварительная заварка их полуавтоматом или вручную с соответствующим увеличением катета углового шва.

7 Кромки деталей под сварку обрабатывают в соответствии с требованиями ГОСТ 8713-79 и ГОСТ 11533-75 (сварка под флюсом), ГОСТ 14771-76 и ГОСТ 23518-79 (дуговая сварка в защитном газе), ГОСТ 5264-80 (ручная дуговая сварка).

8 Проплавляемые при сварке поверхности и прилегающие к ним зоны металла шириной не менее 20 мм, а также кромки листов в местах примыкания выводных планок перед сборкой-сваркой должны быть очищены от ржавчины, окалины и масляных загрязнений.

9 Допускается приварка технологических и транспортировочных приспособлений с последующим их удалением газовой резкой. После удаления указанных приспособлений тщательно зачищают места сварки на глубину 0,5 мм абразивным инструментом.

10 Размеры прихваток должны быть: для стыковых соединений – глубиной 3–4 мм, шириной 6–8 мм, длиной 50–80 мм; для угловых, тавровых и нахлесточных соединений – катет длиной не более 50 % катета углового шва, но не больше 5 мм, длина 50–80 мм.

11 Максимальные расстояния между прихватками должны быть 300–500 мм. Крайние прихватки следует располагать сразу за выводными планками, причем длина прихватки в начале шва должна быть не менее 50 мм, а в конце – не менее 100 мм.

12 При сборке под автоматическую и полуавтоматическую сварку по концам соединений необходимо прикреплять к деталям выводные планки.

13 Припуски по длине деталей на усадку от сварки определяют расчетом либо принимают по таблицам, составленным на основе расчетов и опытно-статистических данных.

14 Сборку и приварку перекрещивающихся между собой ребер жесткости рекомендуется вести в такой последовательности: установка и приварка к листу ребер жесткости не прерывающихся в местах пересечения (как правило, продольных); установка перекрестных ребер жесткости на электроприхватках; взаимная приварка ребер жесткости в местах пересечения; приварка к листу перекрестных ребер жесткости [29].

Технические условия на сварку:

1 Поясные швы и швы ребра жесткости сваривают автоматической сваркой по ГОСТ 8713-79 под слоем флюса.

2 Остальные швы сваривают полуавтоматической сваркой по ГОСТ 14771-76 в среде защитных газов.

3 Сварные стыковые швы вертикальных листов располагают вразбежку с расстоянием между ними не менее 240 мм.

4 Стыковые швы стенок и поясов выполняют с полным проваром автоматической сваркой по ГОСТ 8713-79 под слоем флюса [30].

5 Электроприхватки в сварных соединениях должны полностью проплавляться сваркой основных швов проектного сечения.

6 Ребра плотно подгоняют к нижнему поясу и приваривают сплавным переходом к основному металлу.

## **2. 4 Изготовление ребер жесткости**

Ребра жесткости изготавливаются вырезкой их из листового проката толщиной 10, 12 и 25 мм. Поперечные ребра, в зависимости от их расположения в конструкции, могут быть разными размерами и толщиной. Продольные ребра все имеют одинаковую толщину равную 10 мм.

После резки выполняется механическая обработка, которая включает в себя, подготовку (строжку) кромок и сверление отверстий под болтовые соединения. Сверление отверстий производится на радиально сверлильном станке.

## 2.5 Сборка балки

При сборке балок предъявляются жесткие требования к симметричному расположению и взаимной перпендикулярности (полотнищ) полок и стенки, а так же к прижатию их друг к другу. Так смещение осей полок и стенки не должно превышать 2 мм, а неперпендикулярность полки не более 1 мм. Отклонения высоты стенки в зоне монтажных стыков не более 2 мм, в остальных случаях 4 мм. Грибовидность в зоне монтажных стыков не более 2 мм, в остальных случаях не более 4 мм, выпучивание стенки не более 3 мм [30].

Для сборки балки используется сборочная установка с перекатным по рельсам порталом, которая обеспечивает точное расположение элементов и поджатие горизонтальных листов к вертикальным. Сборка осуществляется следующим образом: стенка выкладывается на опоры установки, на упоры выкладываются полки и выставляются по высоте.

Прихватка осуществляется последовательно от сечения к сечению. Для этого портал подводится к месту начала сборки (середина балки) и включаются вертикальные и горизонтальные пневмоприжимы. Которые прижимают стенку балки к опорам, а пояса – к стенке. В собранном сечении ставятся прихватки. Затем прижимы выключают, портал перемещают вдоль балки на шаг прихватки и операция повторяется.

Прихватка выполняется ручной дуговой сваркой электродами УОНИ 13/55 диаметром 4 мм ГОСТ 9467-75. Длина прихваток 80 мм, шаг между прихватками 500 мм, последняя прихватка выполняется на расстоянии не менее 200 мм от края деталей [31]. Транспортные операции выполняются мостовым краном.

## **2.6 Сборка–сварка ребер жесткости элементов с элементами балок и ортотропных плит**

Сборка ортотропных плит с продольными ребрами до настоящего времени велась вручную. Сборка заключалась в следующем: к полотнищу с двух сторон от места прихватки ребер на равноудалении устанавливалась и прихватывалась стремянка, затем устанавливалось ребро жесткости, между ним и стремянками вручную вбивались клинья, которые выравнивали ребро относительно полотнища и прижимали ребро к нему. Производилась прихватка ребра, затем стремянки срезали, перемещали на 0,5 м вдоль ребра и все операции повторялись. Такой способ сборки сильно увеличивал трудоемкость изготовления и уменьшал точность сборки.

В рамках выполнения поставленных задач по проекту строительства моста, для сборки ребер жесткости на элементах главных балок и ортотропных плит разработан и изготовлен специальный стенд. Стенд представляет собой порталную установку, передвигающуюся по рельсам. Между рельсами устанавливают стеллаж (стеллажи) для сборки балок или плит. На портале установлен пневмоцилиндр с закрепленной на нем направляющей для прижатия и выравнивания ребра.

Последовательность технологических операций при использовании данного стенда состоит в следующем: на стеллаж укладывается настильный лист, промеряются диагонали. Начало сборки ведется от базового торца, учитывая припуск на фрезеровку[31].

На листе отбиваются осевые, с помощью разработанного стенда выставляются продольные ребра, при этом постепенно они прихватываются электродуговой сваркой катетом 3 мм длиной 50 мм через 400–500 мм. Прихватка выполняется ручной дуговой сваркой электродами УОНИ 13/55 диаметром 4 мм ГОСТ 9467-75 [31].

Автоматическую сварку под слоем флюса производят двухдуговым автоматом с предварительным прогибом по ширине плиты (рис. 2.4), сварочной

проволокой 10НМА диаметром 3 мм ГОСТ 2246-70, флюс АН-47 с размером зерна 0,5 мм ГОСТ 9087-81. Торцы ребер не доваривать по 100 мм [32].



Рисунок 2.4 – Сварка ребер жесткости ортотропных плит

Размещают и устанавливают поперечные ребра жесткости, которые предварительно собрали, проваривают механизированной сваркой в смеси аргона и углекислого газа. После сварки ребер производят окончательную термическую правку, зачищают сварные швы, фрезеруют один торец, выполняют монтажные отверстия, дробеструйно очищают конструкцию и окрашивают.

### **3 Основные требования по конструкционной прочности для стальных мостовых балочных конструкций**

На протяжении проектного срока службы мост должен:

1 Оставаться способным выполнять основную свою функцию – транспортное сообщение.

2 Выдерживать все воздействия, которые могут возникнуть при его возведении и эксплуатации.

Воздействия нагрузок, при которых сооружение должно выполнять возлагаемые на него функции необходимо рассматривать как различные проектные ситуации, что также называют сочетания нагрузок.

Воздействия и сочетания нагрузок назначаются в соответствии со СНиП 2.05.03-84, а также с СТО ГК «Трансстрой» 012–2007, основные нагрузки и воздействия, которые необходимо учитывать при расчете мостов[24].

Постоянные нагрузки:

1 собственный вес конструкции;

2 воздействие предварительного напряжения (в том числе регулирования усилий);

3 давление грунта от веса насыпи;

4 гидростатическое давление;

5 воздействие усадки грунта.

Временные нагрузки:

6 бот подвижного состава пешеходов;

7 горизонтальная поперечная нагрузка центробежной силы;

8 горизонтальные поперечные удары подвижного состава;

9 горизонтальная продольная нагрузка от торможения или силы тяги.

Прочие нагрузки:

10 ветровая нагрузка;

11 ледовая;

12 температурные климатические воздействия.



### 3.1 Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающиеся механическим, нагрузкам.

Конструкционная прочность – комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, жесткости, надежности и долговечности[52].

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. При статических нагрузках критериями прочности являются временное сопротивление  $\sigma_{\text{в}}$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , характеризующие сопротивление материала пластической деформации. Поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность, как правило, определяют по пределу текучести.

Кроме стандартных механических характеристик  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{0,2}$ , характеризующих металлургическое и технологическое качество материала, для оценки конструкционной прочности необходимы характеристики прочности при рабочих температурах и в эксплуатационных средах.

Надежность – свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным из-за протекания с большой скоростью при напряжениях ниже расчетных, возможные аварийные последствия[52].

Для предупреждения хрупкого разрушения конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью и ударной вязкостью КСУ.

Стремление к уменьшению металлоемкости конструкций ведет к более широкому применению высокопрочных и, как правило, менее пластичных материалов с повышенной склонностью к хрупкому разрушению. Необходимо также учитывать то, что в условиях эксплуатации действуют факторы, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. Это концентраторы напряжений (надрезы), понижение температуры, динамические нагрузки, увеличение размеров деталей (масштаб-

ный фактор). Чтобы избежать внезапных поломок в условиях эксплуатации, необходимо учитывать трещиностойкость материала.

Трещиностойкость – группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины. Количественная оценка трещиностойкости основывается на линейной механике разрушения. В соответствии с ней очагами разрушения высокопрочных материалов служат небольшие трещины эксплуатационного или технологического происхождения (могут возникать при сварке, термической обработке), а также трещиноподобные дефекты (неметаллические включения, скопления дислокаций и т.п.).

Долговечность – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения, обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени[52].

Причины потери работоспособности разнообразны: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии, радиационного разбухания и др. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение. Обеспечение долговечности материала означает уменьшение до требуемых значений скорости его разрушения.

На данный момент в перспективе является внедрение инновационных методов и материалов, которые позволили бы обеспечить долговечность объекта.

Для масштабного внедрения новых технологий, прежде всего, необходима разработка современной нормативной базы для проектирования, строительства, реконструкции и эксплуатации мостовых сооружений.

Важным элементом в обеспечении долговечности мостов является организация монтажных работ на месте строительства. В частности, сварка металлоконструкций пролетных строений, проводимая с применением более современных технологических регламентов, может значительно повысить конечную надежность мостовых сооружений [33].

Проектирование и строительство конструкций должны обеспечивать их надежную эксплуатацию в течение определенного им срока службы. Это озна-

чает, что с достаточно большой вероятностью строительные объекты будут функционировать без повреждений, препятствующих их эксплуатации.

При проектировании условие надежности конструкции определяется так называемым «предельным неравенством»:

$$S \leq F = R \cdot A, \quad (3.1)$$

где  $S$  – усилия или напряжения, возникающие в конструктивном элементе(сечении);

$F$  – несущая способность элемента;

$R$  – прочность материала;

$A$  – геометрическая характеристика сечения элемента.

И условие общей надежности сооружения – выполнение выше приведенного неравенства для каждого элемента. А достигается эта надежность на всех этапах жизни моста – при составлении норм, проектировании, строительстве и эксплуатации[33].

При мостостроении учитывается целый комплекс конструкционной прочности:

1 Способность выдерживать длительное время циклические нагрузки. Циклическая долговечность характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений. Она тем выше, чем ниже скорость зарождения и скорость развития трещины усталости. Долговечность мостовых сооружений является одним из показателей эффективности вложения инноваций в транспортное строительство.

2 Должна быть высокая жесткость. Именно критерии жесткости, а не прочности обуславливают размеры деталей, от которых требуется сохранение точных размеров и формы.

3 Высокая надежность, коррозионная стойкость, а также пластичность и ударная вязкость, при эксплуатации элементов должно быть полностью исключено внезапное разрушение во время эксплуатации.

4 Высокая прочность, то есть способность воспринимать предельные нагрузки в процессе эксплуатации.

На основании анализа условий эксплуатации элементов конструкции можно сформулировать основные требования:

1 высокая прочность и пластичность в определенном соотношении (желательно, чтобы прочностные характеристики были более высокими);

2 высокая вязкость, коррозионная стойкость, надежность, во избежание хрупкого разрушения во время эксплуатации.

#### **4 Выбор перспективных строительных сталей повышенной прочности для крупного мостостроения**

Мост предназначен для движения автомобильного транспорта и изготавливается в северном исполнении, тип исполнения Б (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Условия эксплуатации

Температура эксплуатации	От + 40 °С до – 60 °С
Внешняя среда	Слабо агрессивная
Характер нагружения	Динамический

Допустимые нагрузки, действующие на мост, задаются в соответствии с СНиП 2.01.07-85, а также с СТО – ГК «Трансстрой» –012–2007, который устанавливает основные положения и правила по определению и учету постоянных и временных нагрузок и воздействий, а также их сочетаний[24].

##### **4.1 Анализ основных возможных металлических материалов**

Легированной называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (*Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti* и др.), а также *Mn* и *Si* в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1% и выше). Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование.

Легированные стали и сплавы используют для улучшения их эксплуатационных и технологических свойств. Легированием можно повысить предел текучести, ударную вязкость, относительное сужение и прокаливаемость, а также существенно снизить скорость закалки, порог хладноломкости, деформируемость изделий и возможность образования трещин. В изделиях крупных сечений (диаметром свыше 15–20 мм) механические свойства легированных сталей значительно выше, чем механические свойства углеродистых сталей.

Основными легирующими элементами конструкционных сталей являются хром, никель, кремний, медь и марганец[37].

Основные марки сталей, применяемые в настоящее время, регламентируются СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы», раздел 4 «Стальные конструкции», и с СТО - ГК «Трансстрой» –012 – 2007[24].

Тип исполнения стальных пролетных строений в зависимости от значения расчетной минимальной температуры следует назначать в соответствии с таблицей 4.2[5].

Мостовые стали различаются по классу прочности. Класс обозначают буквой С и дробью, числитель которой указывает предел прочности в килограмм – силах на квадратный миллиметр, знаменатель – предел текучести в тех же единицах измерения, принимаемый за нормативное сопротивление стали( $1 \text{ кг.с/мм}^2 = 0,1 \text{ МПа}$ ) [27].

Для сталей, у которых диаграмма растяжения не имеет выраженной площадки текучести, вводят такое понятие, как условный предел текучести, т.е.напряжение, соответствующее 0,2% остаточного удлинения образца стали.

Таблица 4.2 – Температурный режим

Расчетная минимальная температура, °С	Тип исполнения
Менее -40 (включая)	Обычное
От -40до -50	Северное А
Менее -50	Северное Б

При этом за минимальную расчетную температуру воздуха принимается средняя температура воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,98 для стальных конструкций.

С учетом типа исполнения назначаются и категории стали для изготовления металлических мостовых конструкций. Чем выше категория стали, тем больший объем испытаний прошли образцы из нее, а также шире область ее применения. Но чем выше категории стали, тем самым она дороже. Например,

для стали первой категории не проводят испытания на ударный изгиб при температуре ниже  $-50^{\circ}$ , а для стали второй категории эти испытания уже будут обязательными. Поэтому необоснованное увеличение требований к стали ведет также и к удорожанию самой металлической конструкции.

Нормативные и расчетные сопротивления стального проката, применяемого в мостостроении (таб.4.3) [33].

Таблица 4.3 –Нормативные и расчетные сопротивления

Марка стали	Государственный стандарт	Прокат	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление, МПа		Расчетное сопротивление, МПа	
				По пределу текучести $R_{yp}$	По временному сопротивлению $R_{un}$	По пределу текучести $R_y$	По временному сопротивлению $R_u$
16Д	ГОСТ 6713-91	Любой	41–60	215	370	195	340
15ХСНД	ГОСТ 6713-91	Лист	33–50	330	470	285	400
10ХСНД	ГОСТ 6713-91	Лист	33–40	390	510	350	450

Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность. Конструкционной прочностью называется комплекс механических свойств, обеспечивающий надежную и длительную работу материала, в условиях эксплуатации.

Требуемые значения механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и от воздействия на него рабочей среды и температуры.

Кроме механических свойств – предел текучести, предел прочности, и относительное удлинение для мостовых сталей одним из важных показателей является критерий ударной вязкости. Это разрушения опаснее пластического, потому что оно происходит внезапно. Вероятность хрупкого разрушения возрастает

тает с понижением температуры и ростом концентрации напряжений в опасных сечениях.

В результате многократного приложения нагрузки в элементах конструкций могут возникнуть и развиваться усталостные микротрещины, на определенной стадии развития микротрещин может возникнуть полное разрушение всей конструкции.

Одним из основных показателей сопротивлению материала усталости является циклическая долговечность – это число циклов приложения нагрузки, выдержанное конструкцией до образования усталостных трещин или до полного разрушения.

Условия работы и эксплуатации изделия непосредственно влияют на выбор основного металла.

Углеродистые стали обыкновенного качества преимущественно используют в строительстве как наиболее дешевые, технологичные и обладающие прочностью, достаточной для изготовления металлоконструкций различного назначения (рис.4.1).

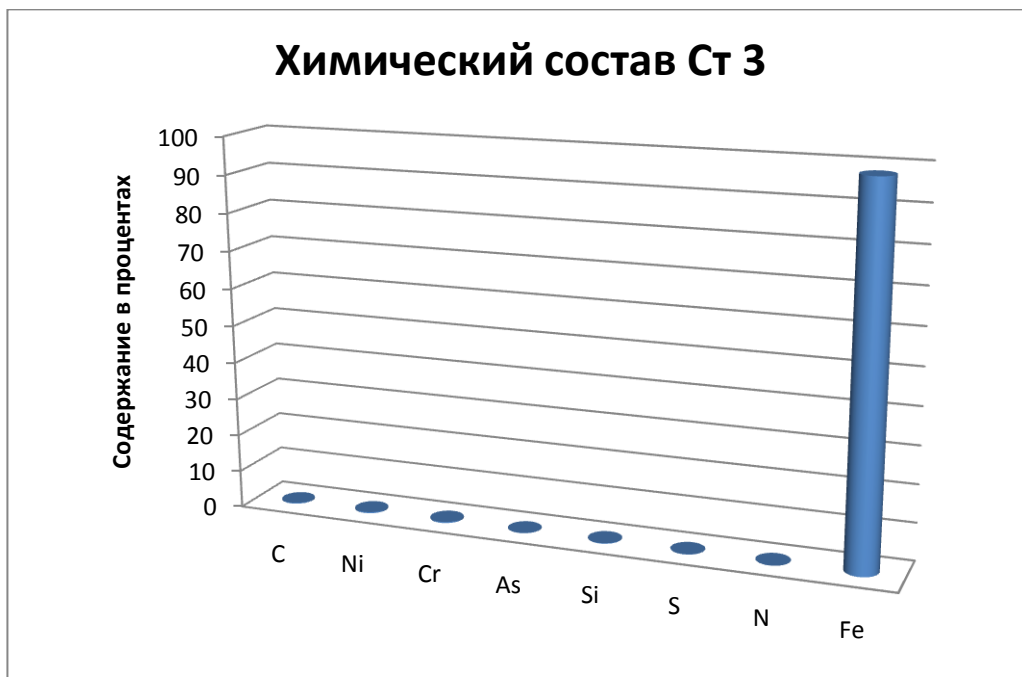


Рисунок 4.1 – Химический состав Ст 3



ГОСТ 380-2005 нормирует выпуск углеродистой стали обыкновенного качества, к которой относится и сталь марки Ст3. Предназначена она для изготовления сортового и фасонного проката, толсто- и тонколистового, широкополосного и холоднокатаного тонколистового. Трубы (в том числе, и труба прямоугольная Ст3), штамповки и поковки, ленты, проволоки и метизы – все это получают из стали Ст3.

Одно из важных достоинств марки – хорошая свариваемость. Сплав позволяет применять ручные и автоматические дуговые способы сварки (под флюсом и газом), а также электрошлаковый и контактно-точечный методы.

Алюминий занимает второе место среди всех металлов по объемам производства и потребления. На первом давно и, судя по всему, надолго закрепилось железо.

Вслед за стальными строители начали применять алюминиевые строительные конструкции. Уже в начале 20 века отдельные городские здания украсились алюминиевыми фасадами. А спустя некоторое время были построены первые алюминиевые мосты[28].

В начале прошлого века алюминий почти не использовался в строительстве, из-за того, что был слишком дорогим металлом и не выпускался в достаточных объемах.

Минимальный расчетный срок службы алюминиевых конструкций составляет 80 лет. Алюминий используется в любых климатических условиях и не теряет своих свойств в диапазоне температур от  $-80^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ .

Сооружения из алюминия мало подвержены разрушению при пожарах, а при низких температурах этот металл становится более прочным.

Важное качество алюминия – легкость. Благодаря малому удельному весу алюминиевая пластина оказывается в 2 раза легче стальной при одинаковой жесткости. Получается, что при одинаковой несущей способности вес алюминиевых конструкций в 2–3 раза меньше веса стальной и до 7 раз меньше железобетонной[30].

Сплавы с содержанием алюминия характеризуются небольшой массой и объемом, высокими прочностными показателями и отличными пластическими свойствами даже при низких температурах[29].

Стойкость сплавов к коррозии дает возможность составлять элементы конструкции небольшой толщины, но при этом они будут соответствовать требованиям прочности или устойчивости. Незначительная масса несущих конструкций дает возможность уменьшать размеры и массу колонн и фундаментов, сокращать транспортные расходы, шире применять новые виды подъемно-транспортных средств. Высокая хладостойкость алюминиевых сплавов имеет большое значение для строительства в северных странах[29].

Перестройка Смитфилдского моста в Питтсбурге (США–1933 г.) благодаря использованию алюминия обошлась в 5 раз дешевле, так как было сэкономлено в весе проезжей части 700 тонн и сохранены опоры [29].

По стойкости против коррозии алюминиево-магниевые сплавы занимают первое место после технически чистого алюминия. Хорошо свариваются. Применяются для листовых и для сварных стержневых конструкций.

Из всех алюминиевых сплавов наибольшее распространение получили дуралюмины благодаря их высокой прочности. Это термически упрочненные сплавы: Д6-Т, Д-16. Они характеризуются большим содержанием меди (4–5%). В меньших количествах в них входят магний и марганец (рис. 4.2).

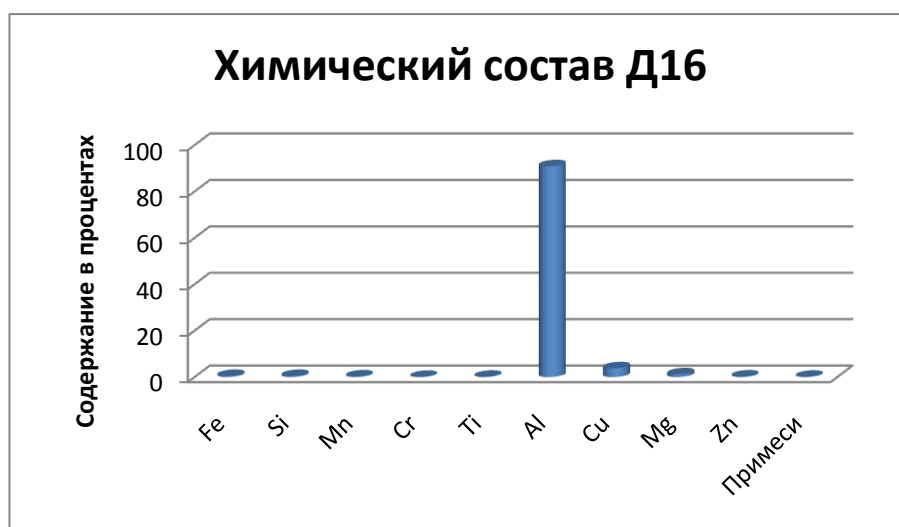


Рисунок 4.2 – Химический состав Д16

Техническими условиями проектирования конструкций из алюминиевых сплавов рекомендован к применению в строительстве высокопрочный сплав Д16, как наиболее экономичный.

Одним из недостатков дуралюминов является меньшая по сравнению с другими сплавами стойкость против коррозии. Рекомендуется, конструкции, выполненные из дуралюмина, окрашивать.

Титан – это металл, который, благодаря своим физико-химическим свойствам, может использоваться там, где применение других металлов и их сплавов недопустимо. Он очень легкий, прочный, отличается крайне низкой теплопроводностью, инертностью и устойчивостью к коррозии.

Титановые сплавы – это передовые металлические интерметаллиды, в основе которых лежит титан, обладающий непревзойдённой антикоррозийностью, конструкционной прочностью и тугоплавкостью. Высокая химическая пассивность титана превосходит аналогичные характеристики лучших марок нержавеющей сталей. Эти свойства в той или иной степени имеют место в различных титановых сплавах, что обуславливает высокий спрос на эту группу металлов в различных областях промышленности. Титановые сплавы получают путём традиционного легирования чистого титана дополнительными металлами и минералами, что позволяет получать на выходе материалы с различными физико-химическими свойствами. Основные легирующие элементы в титановых сплавах это алюминий, никель, олово, медь, железо, молибден, цирконий, ванадий и хром.

На сегодняшний день титан является достаточно дорогим металлом и его применение должно быть экономически оправдано. Титан очень часто используют в ряде промышленных производств.

Сплав ВТ6 используется от изготовления крупногабаритных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов до применения в медицине. Такое широкое распространение этого сплава объясняется удачным его легированием. Алюминий повышает прочностные и жаропрочные свойства, а ванадий отно-

сится к числу тех немногих легирующих элементов в титане, которые повышают не только прочностные свойства, но и пластичность.

Химический состав сплава ВТ6 представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Химический состав сплава ВТ6

Сталь конструкционная низколегированная, используется для сварных конструкций. Свариваемость без ограничений. Способы сварки: РДС и АДС под флюсом и газовой защитой, ЭШС.

Химический состав представлен на рисунке 4.4.

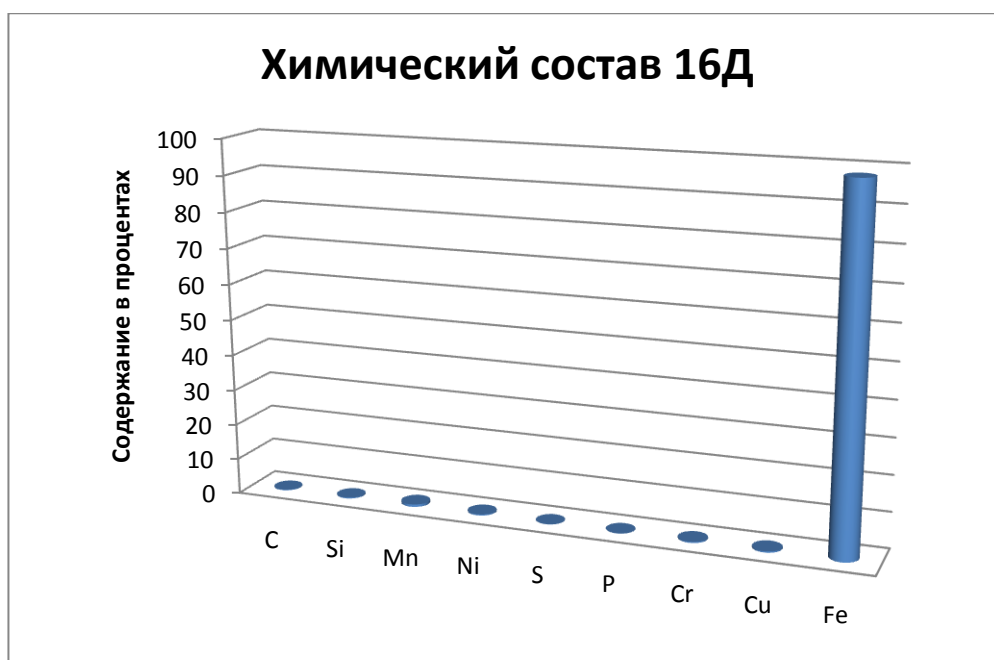


Рисунок 4.4 – Химический состав 16Д

Расшифровка стали 16Д:

- 0,16 % содержания углерода.

- Д – медь, увеличивает антикоррозионные свойства, вводится главным образом в строительную сталь.

Одновременное введение в сталь меди и никеля приводит к увеличению коррозионной стойкости сталей в атмосферных условиях.

Сталь 15ХСНД – низколегированная конструкционная (строительная) сталь, с содержанием углерода 0,15%. Эта сталь в виде листов, сортового фасонного проката применяют в строительстве и машиностроении для сварных конструкций, в основном без дополнительной термической обработки (ГОСТ 19281-73, ГОСТ 19282-73) [45].

Сталь поступает после закалки и отпуска, что значительно повышает её прочность, понижает порог хладноломкости и склонность к старению. Сталь имеет достаточную прокаливаемость и приобретает после улучшения высокие прочностные свойства в деталях большего сечения. Это достаточно дешёвая сталь, обеспечивает высокий уровень механических свойств, обладает также и хорошими технологическими свойствами: свариваемостью, обрабатываемостью давлением и резанием [12].

Химический состав стали 15ХСНД и в процентном содержании представлен на рисунке 4.5.

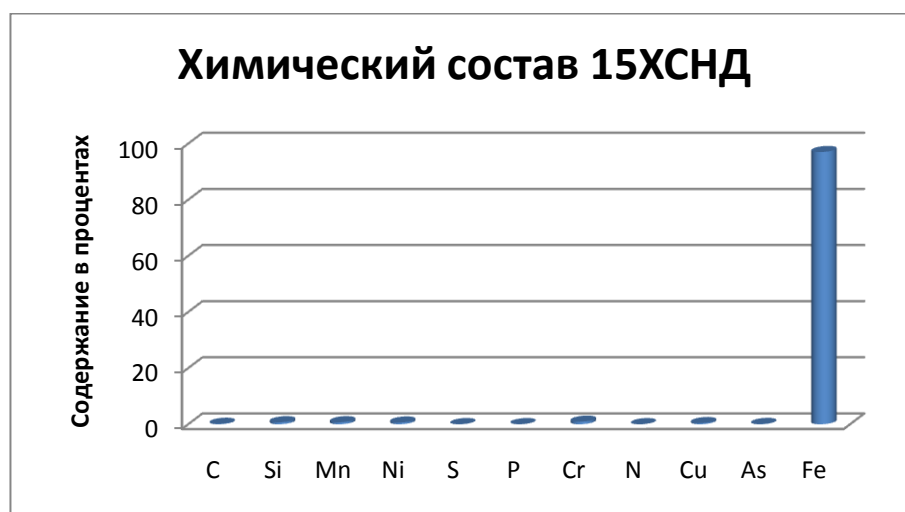


Рисунок 4.5 – Химический состав стали 15ХСНД в процентном соотношении

Сталь марки 15ХСНД также используют для сварных ферм, конструкций мостов, вагонов, рам, аппаратов и сосудов химической промышленности. К недостаткам следует отнести склонность к отпускной хрупкости. Сталь относится к группе специальных сталей, которые содержат малое количество углерода, но при этом обладают повышенной прочностью. Это объясняется тем, что сталь содержит в своем составе легированные элементы – кремний и никель [45].

В зависимости от нормируемых механических свойств низколегированные стали (толстолистовую и широкополосную универсальную по ГОСТ 19282-89 и сортовую и фасонную по ГОСТ 19281-89) поставляют по 15 категориям, которые указывают в заказе и документе о качестве стали [37].

Сталь 10ХСНД, изготовленная по нормативу ГОСТ 6713-91, предназначена для изготовления инженерных сооружений, мостовых конструкций простого и северного исполнения (температура  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Кроме того, благодаря наибольшей прочности и устойчивости от коррозии ее применяют также в элементах сварных конструкций и в деталях специализированной техники.

Сталь 10ХСНД – низколегированная строительная сталь, содержание углерода 0,10 % (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Химический состав стали 10ХСНД в процентном соотношении

Предел прочности листового проката марки стали 10ХСНД составляет от 510 до 685 МПа. Сталь этой марки используется с элементами сварных конструкций из металла и различными деталями, к характеристике которых предъявляются высокие требования прочности и предохранения от коррозии с лимитированием массы [12].

Применение низколегированных сталей, имеющие предел текучести 330 МПа, взамен углеродистых, позволяет сэкономить 15 % металла, экономия может достигать 25–30 % [11].

Более высокая прочность строительных низколегированных сталей, в сравнении с углеродистыми сталями, достигается упрочнением феррита за счет легирования сравнительно малыми количествами кремния, марганца, хрома, никеля, меди и других элементов [11].

Стали марок 10ХСНД и 15ХСНД, содержат никель и медь, введение таких элементов значительно увеличивает коррозионную стойкость металла в атмосферных условиях. Стали используют для изготовления наиболее ответст-

венных сварных металлоконструкций, эксплуатируемых в обычных климатических условиях, а также в сооружениях северного исполнения, эксплуатируемых в районах с температурой ниже  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , без перехода в хрупкое состояние [37].

Строительные низколегированные стали применяют главным образом в виде листов разной толщины, а также в виде сортового проката.

Применение более прочных низколегированных сталей, в строительных конструкциях, вместо углеродистых, дает возможность снизить расходы металла на 15–25 %.

Таким образом, несмотря на более высокую стоимость низколегированных марок, их использование является экономически целесообразно и выгодным для производства, по сравнению с обычными углеродистыми.

Мосты для автотранспорта изготавливают из стали классов С 46/33 – С 70/60 к ним относятся стали марок 15ХСНД, 10ХСНД, 16Г2АФ [11].

Существенное влияние при выборе материала и марок стали имеют климатические условия. Если наименьшие температуры выше  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то к металлу не предъявляют специальных требований по хладноломкости. При наименьших температурах ниже  $-40$  или  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  материал должен иметь устанавливаемую нормами хладноломкость.

В сталях для конструкций ортотропных плит содержание углерода составляет 0,1–0,25 %. При таком его количестве сталь хорошо поддается механической обработке, обладает вязкостью, пластичностью и способностью свариваться. Увеличение содержания углерода повышает прочность и предел текучести стали, но делает ее более хрупкой, ухудшает свариваемость и увеличивает трудоемкость механической обработки.

Низколегированные стали обладают значительной прочностью, пластичностью, в достаточной степени хорошо обрабатываются и свариваются, обладают повышенной устойчивостью против коррозии и имеют сравнительно низкую стоимость [53].

В зависимости от нормируемых механических свойств низколегированные стали (толстолистовую и широкополосную универсальную по ГОСТ



19282-89 и сортовую и фасонную по ГОСТ 19281-89) поставляют по 15 категориям, которые указывают в заказе и документе о качестве стали [27].

Сера и фосфор являются вредными примесями стали. Сера образует в расплаве сульфид железа, который имеет меньшую, чем сталь, температуру плавления ( $1193^{\circ}\text{C}$ ) и при нагреве до светло красного каления нарушает межкристаллитную связь между зернами сплава, в результате чего сталь теряет прочность и образует трещины при остывании после сварки.

Фосфор растворяется в железе. Он резко снижает ударную вязкость, особенно при отрицательных температурах. Поэтому ГОСТ 6713-91 ограничивает содержание серы и фосфора в стали 15ХСНД: для конструкций обычного исполнения не более 0,035%, а для конструкций северного исполнения – серы не более 0,03%, а фосфора – не более 0,025%.

С целью уменьшения количества газовых пузырей, образуемых окисью углерода, применяют раскислители и успокоители (Si, Mn), которые отбирают кислород, образуя твердые не вредные окислы и непосредственно связывают  $\text{CO}_2$  образуя нитриды, гидриды, карбониты. Также наличие Mn повышает ударную вязкость и хладноломкость, обеспечивая удовлетворительную свариваемость. Введение в сталь небольшого количества меди ( $\text{Cu} = 0,3\text{--}0,4\%$ ) повышает стойкость стали против коррозии в атмосферной и морской воде.

Кроме ГОСТ, отдельные виды проката поставляют по специально разработанным техническим условиям или по техническим условиям, дополняющим требования ГОСТ. Так сталь 15ХСНД толщиной 32–50 мм для сварных мостов поставляют по ТУ 14-1-5120-92.

Сталь по этим ТУ предназначена для изготовления сварных конструкций и имеет химический состав соответствующий ГОСТ, за исключением серы, содержание которой должно быть не более 0,030%. Сталь раскисляют алюминием и титаном и поставляют в нормализованном или термически улучшенном состоянии.

При заказе металла для пролетных строений мостов обуславливают предусмотренные проектом или специальными нормативными документами дополнительные требования к металлу.

Прокат для конструкций ортотропных плит северного исполнения испытывают на изгиб при нормальной температуре в соответствии с ГОСТ 5521-86 на широком образце. Структура проката на излом должна быть однородной и не иметь видимых невооруженным глазом следов гармошки, трещин и пузырей вздутия. В изломе не допускаются волосовины и мелкие расслоения.

Строительную сталь высокой прочности 16Г2АФ производят и поставляют в соответствии с ГОСТ 19281-89 и ГОСТ 27772-88 [54].

Высокая прочность этой стали достигается термическим упрочнением и контролируемой прокаткой.

Термическое упрочнение этой стали заключается в закалке от 850–920°C и высоком отпуске при 600–680 °С. Этому упрочнению подвергают прокат толщиной до 40–50 мм из стали 16Г2АФ [45].

После высокого отпуска получается высокодисперсная смесь продуктов распада, мартенсита и нижнего бейнита.

Уровень свойств сталей зависит от сочетания легирующих элементов и микродобавок. Наиболее широкое распространение получила сталь 16Г2АФ. После нормализации она имеет мелкое зерно (10–20 мкм), высокую прочность в сочетании с низким порогом хладноломкости [52].

Химический состав стали 16Г2АФ представлен на рисунке 4.7.

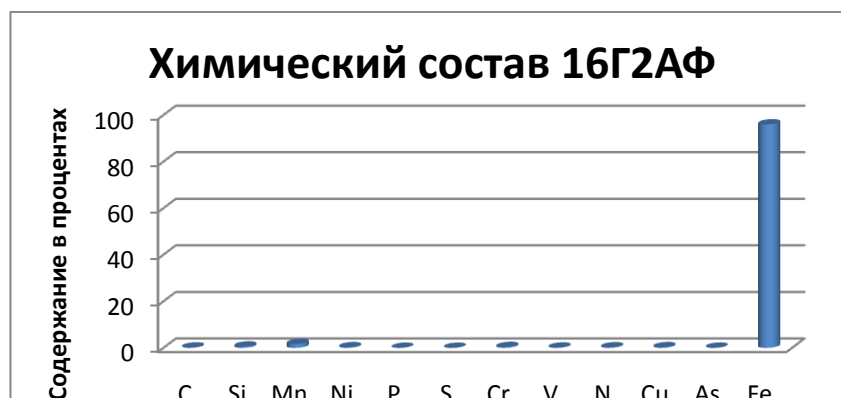


Рисунок 4.7 – Химический состав 16Г2АФ в процентном соотношении

Высокопрочные стали применяют для ответственных металлоконструкций, пригодных для эксплуатации при температурах ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также для магистральных газопроводных труб северного исполнения.

Конструкционная низколегированная марганцово-ванадиевая с азотом сталь 16Г2АФ используется для изготовления сварных конструкций, ферм для продукции машиностроения [52].

#### **4.2 Рекомендации по основным конструкционным металлическим материалам для крупного мостостроения**

Исходя, из данных, представленных в таблице Б1, можно исключить сталь Ст3 по причине низкого предела прочности, а также эта сталь не коррозионностойкая, что для строительства моста неприемлемо.

Сталь 16Д не подходит из-за низкого предела прочности и текучести, использование ее в изготовлении ортотропных плит и балок считаю не целесообразным.

Титановый сплав ВТ6 обладает хорошими прочностными свойствами, а также хорошей пластичностью и низкой плотностью. Изготовление плит и балок из этой стали возможно, но из-за высокой цены использование сплава ВТ6 не рентабельно.

В сталях для конструкций ортотропных плит содержание углерода составляет 0,1–0,25 %. При таком его количестве сталь хорошо поддается механической обработке, обладает вязкостью, пластичностью и способностью свариваться. Увеличение содержания углерода повышает прочность и предел текучести стали, но делает ее более хрупкой, ухудшает свариваемость и увеличивает трудоемкость механической обработки.

Сталь 10ХСНД содержит меньше углерода, в отличие от стали 15ХСНД, но по прочности она не отстывает, а даже опережает её, в связи с большим содержанием кремния, никеля и меди, по этой же причине и идет удорожание стали 10ХСНД. Микроструктура сталей 10ХСНД и 15ХСНД вне зоны термиче-

ского влияния имеет феррито-перлитное строение, характерное для данных марок стали.

Эти стали предназначены для конструкций северного исполнения, работающих при температурах от -40 до -60 °С. Обладают неограниченной свариваемостью, высоким порогом хладноломкости, не склонны к охрупчиванию, имеют высокие механические свойства [54].

### **4.3 Опыт практического мостостроения**

Четвёртый автомобильный мост через Енисейв Красноярске входит в число крупнейших инфраструктурных объектов современной России(рис. 4.8).

Конструкция моста – комбинированная: стальные конструкции и железобетонные элементы. Покрытие моста: асфальтобетон. Мостовой переход состоит из одного элемента.

Общий вес смонтированных металлоконструкций пролётных строений мостового перехода составляет 26 177,9 тонны, объём – 328,72 кубометра железобетонных пролётных строений.

Стоимость строительства четвертого моста через Енисей – почти 12 млрд рублей. Для строительства такого типа используют геомембрану, которая создает долговечную изоляцию для опор моста, а геотекстиль с геосеткой при укладке дорожной одежды упрочняет основание дорожного полотна и укрепляет асфальт, что позволяет повысить износоустойчивость и длительную эксплуатацию дорог без введения полос в аварийное состояние для ремонта.

Для строительства пролетных строений использовалась сталь марки 15ХСНД, что по климатическим условиям соответствует климату г.Красноярска. Выбор этой стали оправдан, она предназначена для конструкций северного исполнения, работающих при температурах от + 40 до – 60 °С.Сталь обладает неограниченной свариваемостью, достаточной хладноломкостью, не склона к охрупчиванию, имеет высокие механические свойства, однако предел прочности ниже, чем у стали 10ХСНД, это объясняется тем, что содержание

кремния и никеля у 15ХСНД меньше, чем у 10ХСНД. Стали 15ХСНД и 10ХСНД обе конкурентоспособны и в данном случае их можно было скомбинировать и применить в конструкциях в зависимости от условий воспринимаемых нагрузок. Химический состав сталей можно посмотреть в таблице А1.

**Вантовый мост через Даугаву в Риге.** Вантовый мост через Даугаву в Риге был открыт в 1981 году и является одним из наиболее известных советских мостов.

На момент открытия в 1981 году этот мост являлся самым длинным вантовым мостом в Европе.

Центральный пролёт моста составляет 312 метров (рис.4.9).



Рисунок 4.8 – Красноярский четвертый мост



Рисунок 4.9– Вантовый мост через Даугаву в Риге

Металлические конструкции были изготовлены на Воронежском мостовом заводе. Строительство моста началось в октябре 1978 года. Крупные секции пролетного строения собирались на берегу, а затем были доставлены на понтонах.

Балка жесткости сварной коробчатой конструкции с ортотропной плитой проезжей части. Высота коробчатого сечения балки жесткости около 3,1 м, ширина полостей коробки – по 5,3 м. Стенки коробки имеют вертикальные и горизонтальные ребра жесткости.

Балка жёсткости в поперечном сечении состоит из трёх коробок, шириной по 5,3 метра каждая, с симметричными консолями по 6,3 м, усиленными подкосами из уголков. Полная ширина балки жёсткости – 28,6 м. Материал балки жесткости - сталь 10ХСНД. Сталь обладает хорошими коррозионными свойствами, что подходит к климату Риги, климат влажный, нет низких температур, которые могут достигать до - 50 °С.

Вантовый мост через Даугаву в Риге, отмеченный Государственной Премией Российской Федерации – несомненно, один из шедевров отечественного мостостроения.

## 5 Технико-экономический анализ

Эффективность выполнения построения моста складывается из удачного сочетания эксплуатационных свойств конструкционных материалов, а также технологических и экономических показателей.

Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность, подробно можно посмотреть в разделе 3 и 4 выпускной работы.

Технологические требования, направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала оценивается свариваемостью, склонностью к пластической деформации и обрабатываемостью резаньем [45].

Технологичность материала имеет значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

Свариваемость – свойство металлов образовывать сварное соединение при установленной технологии сварки, которое отвечает требованиям конструкции и эксплуатации изделий [52].

Технологическая свариваемость – возможность получения сварного соединения определенным способом сварки. По технологической свариваемости устанавливаются оптимальные режимы сварки и способы сварки, последовательность выполнения работ для получения требуемого сварного соединения. Основными показателями технологической свариваемости являются стойкость образуемого присваркешва против горячих трещин и против изменений в металле под действием сварки.

Эксплуатационная свариваемость определяет области и условия допустимого применения металлов и сплавов в сварных конструкциях и изделиях.

На свариваемость стали и сплавов оказывают влияние химические элементы, входящие в их состав, прежде всего углерод и легирующие элементы [49].

Анализируя таблицу 5.1 можно сразу исключить сплав Д16 не только по эксплуатационным свойствам, но и по технологическим требованиям, т.к сплав трудносвариваемый. Д16 имеет наибольшую склонность к образованию горячих трещин. Сплав классифицируется как термоупрочняемый, но не предназначен для сварки. Однако его можно сваривать точечной сваркой, хотя в большинстве случаев детали из него закрепляются с помощью креплений. Также из Д16 могут изготавливать и сами крепления в виде заклёпок с антикоррозионным покрытием. Сплав легко обрабатывается резанием.

Таблица 5.1 – Свойства технологические и экономические

Марка стали	Свариваемость	Метод размерной обработки (обработка резанием)	Обработка методом ОМД	Стоимость за тонну, руб
10ХСНД	Без ограничений	+	+	69800
15ХСНД	Без ограничений	+	+	64000
16Д	Без ограничений	+	+	30800
ВТ6	Удовлетворительно	-	+	1800000
Ст3	Без ограничений	+	+	33500
Д16	Трудносвариваемая	+	+	65000

Сталь 15ХСНД, хромокремненикелевая сталь, характеризуется универсальностью применения. Благодаря возможности сварки без дополнительного подогрева и необходимости нормализации, она широко используется в машиностроительной промышленности, в авиастроении и судостроении, в производстве строительных свай и железнодорожных вагонов [37].

Хромокремненикелевая сталь 10ХСНД широко используется для производства элементов сварных конструкций и деталей с повышенными качествами прочности и стойкости к коррозии. Благодаря легирующим элементам, входящим в состав, 10ХСНД отличается хорошей свариваемостью. Для проведения



сварочных работ не требуется подогрев или последующая термообработка швов[37].

Титановый сплав ВТ6 плохо обрабатывается резанием, что обусловлено рядом физико-механических свойств титана. Сплав отличается высоким отношением предела текучести к временному сопротивлению разрыва. Это соотношение составляет для титановых сплавов 0,85–0,95, в то время как для сталей оно равно 0,65–0,75. В итоге при механической обработке титановых сплавов возникают большие удельные усилия, что приводит к высоким температурам в зоне резания, обусловленным низкой тепло – и температуропроводностью титана и его сплавов, затрудняющей отвод тепла из зоны резания. Из-за сильной адгезии и высоких температур титан налипает на режущий инструмент, что вызывает значительные силы трения. Налипание и приваривание титана на контактируемые поверхности режущего инструмента приводят также к изменению его геометрических параметров.

Отклонение геометрических параметров режущего инструмента от оптимальных их значений приводит к дальнейшему повышению усилий обработки и температуры в зоне резания и износа инструмента. Температура в зоне резания наиболее сильно повышается с увеличением скорости резания, в меньшей степени – с увеличением подачи. Глубина резания по сравнению со скоростью и подачей оказывает еще меньшее влияние[54].

Экономические требования сводятся к тому, чтобы материал, имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы по возможности должны содержать минимальное количество легирующих элементов. Использование материалов, содержащих легирующие элементы, должно быть обосновано повышением эксплуатационных свойств деталей.

Экономические требования, так же как и технологические, приобретают особое значение при массовом масштабе производства. Таким образом, качественный конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований [48].

Однако оценка экономичности по одной только строительной стоимости недостаточна. Необходимо также учитывать срок службы, эксплуатационные условия, расходы на содержание, ремонт и возможную реконструкцию сооружения.

Только рассматривая общий комплекс требований, предъявляемых к данному мосту, исходя из реальных условий его постройки и эксплуатации, учитывая имеющиеся на месте ресурсы и возможности, а также общие народно - хозяйственные условия, можно произвести правильную оценку сооружения и выбрать экономически наиболее обоснованный вариант.

Технико-экономический анализ подтвердил, что на данном этапе рациональным решением является комбинированное использование сталей 10ХСНД и 15ХСНД. Сталь 10ХСНД для изготовления ортотропных плит, а сталь 15ХСНД для изготовления балок. Эти стали предназначены для конструкций северного исполнения, работающих при температурах от -40 до -60 °С. Стали обладают неограниченной свариваемостью, высоким порогом хладноломкости, не склонны к охрупчиванию, имеют высокие механические свойства, а также с экономической точки зрения использование этих сталей считаю оптимальным[44].

Использование титановых и алюминиевых сплавов требует дополнительно доскональных исследований, а также дополнительных денежных вложений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Колоколов Н.М. Строительство мостов / Н.М.Колоколов, Б.М.Вейнблат// Учебник. – Москва: Транспорт – 1984. – 504 с.
- 2 Васильев А.А. Металлические конструкции / А.А. Васильев // Учеб.пособие для техникумов – Москва: Стройиздат, 1986. – 420 с.
- 3 Беленя Е.И. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов / Е.И. Беленя В.А. Балдин Г.С. Ведеников[и др.]. – Москва:Стройиздат, 1998. – 560 с.
- 4 Колоколов Н. М. Строительство мостов / Н.М. Колоколов, Б.М. Вейнблат// Учебник. – Москва: Транспорт, 1984. – 504 с.
- 5 Ведеников Г.С. Металлические конструкции: Общий курс: Учеб.для вузов / Г.С. Ведеников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатъева [и др.] – Москва: Стройиздат, 1998. – 760 с.
- 6 БогдановГ.И. Проектирование мостов и труб. Металлические конструкции / Г.И. Богданов, С.Р. Владимирский, Ю.Г. Козьмин, В.В. Кондратов – Москва: Маршрут, 2004.
- 7 Поиск патентов [Электронный ресурс]: Стыковое соединение монолитной железобетонной плиты пролетного строения моста. Режим допуска: [www.findpatent.ru/patent/211/2110639.html](http://www.findpatent.ru/patent/211/2110639.html).
- 8 РешетниковВ.Г Новые эффективные конструкции сталежелезобетонных пролетных строений мостов / В.Г Решетников – 2002 – 30–50 с.
- 9 Дробышевский Б.А. Бесшовные мосты / Б.А. Дробышевский// Учебнок пособие. – Москва: РИОР: ИНФА-М. 2014. –154 с.
- 10 Ефимов П.И. Автомат, сварка / П.И.Ефимов, В.Ю.Шишкин, В.А.Макурин, Е.С.Олекова – 1987. № 3. – 54–55 с.
- 11 Болдырев А.М. Автоматная сварка / А.М. Болдырев, В.А. Биржев, А.В. Черных, И.М. Соколов– 1987. № 6. – 56–57 с.
- 12 Все о строительстве мостов [Электронный ресурс]: Технология строительства мостов. Режим доступа: <http://www.mostow.ru/tehnologi7.php>.

- 13 Владимирский С.Р. Вариантное проектирование металлического моста / С.Р. Владимирский // Учебное пособие СПбГАСУ – СПб: Изд-во ДНК, 2004.
- 14 Мамлин Г.А. Производство конструкций стальных мостов / Г.А. Мамлин – Москва: Транспорт, 1994. – 391 с.
- 15 Zsin.A.S.New Category of Semi-integral Abutment in China / A.S.Zsin.//Structural Engineering International –2005. Vol.15. № 3. – P210–216.
- 16 Гибшман М.Е.Проектирование транспортных сооружений / М.Е.Гибшман, В.И. Попов – Москва: Транспорт, 1991.
- 17 Косза П. Необычный мост по технологии надвижки. Мост черезавтобанМюнстер-Зюд / П. Косза, В. Краутшалд, Х.Шмитц // Бетон и железобетон. – Берлин: Ернст. 2004.
- 18 Докипедия[Электронный ресурс]: Объединение металлических балок с монолитной железобетонной плитой посредством непрерывных гребенчатых упоров в сталежелезобетонных пролетных строениях мостов. Режим доступа: <http://dikipedia.ru/print/5173053>.
- 19 Попов В.И. Наукоеведение: журнал/ В.И. Попов – 2014.
- 20 Смирнов В.Н. Строительство мостов и труб / В.Н. Смирнов – СПб: Изд-во ДНК, 2007. – 288 с.
- 21 Сибновости[Электронный ресурс]: Мосты. Режим доступа: <http://krsk.sibnovosti.ru/>.
- 22 Борисоглебский Ю.В. Металлургия алюминия / Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В. [и др.] //Учебное пособие – Новосибирск: Наука, 1999. – 438 с.
- 23 СТО-ГК «Трансстрой»-012-2007. Стандарт организации. Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление.
- 24 ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия. – Введ. 01.01.1979. – Москва. – 11–25 с.
- 25 СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы. – Москва, 2005.
- 26 ГОСТ 9087 Флюсы сварочные плавленые. Технические условия. – Введ. 01.01.1982. – Москва. – 6–25 с.

- 27 ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения расчета. – Введ. 01.01.1976. – Москва. – 10–25 с.
- 28 ГОСТ 6713-91 Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения. Технические условия. – Введ. 01.01.1985. – Москва. – 4–10 с.
- 29 ГОСТ 8713-79 Сварка под флюсом – Введ. 01.01.1985. – Москва. – 10–25 с.
- 30 ГОСТ 9467-75 Electroды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. – Введ. 01.01.1977. – Москва. – 4–15 с.
- 31 ГОСТ 9087-81 Флюсы сварочные плавленные – Введ. 01.01.1982. – Москва. – 4–25 с.
- 32 Васильев А.И. Потребительские свойства мостов / А.И. Васильев // Труды ЦНИИС – Москва, 2002. №208.
- 33 Васильев А.И. Основы надежности транспортных сооружений / А.И. Васильев // Учебное пособие – Москва, МАДИ. – 46 с.
- 34 Массанский О.А. Материаловедение и технологии конструкционных материалов / О.А. Массанский, В.С. Казаков, А.М. Токмин, Л.А. Свечникова, Е.А. Астафьева – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 268 с.
- 35 Материаловедение и технология металлов – Москва: Высшая школа, 2001. – 637 с.
- 36 Курдюмов Г.В. Явление закалки и отпуска стали / Г.В. Курдюмов – Москва: Металлургиздат, 1960. – 64с.
- 37 Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин– М.: Машиностроение, 1993. – 448 с.
- 38 Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев– Москва: Металлургия, 1986. – 544 с.
- 39 Зарембо Е.Г. Превращения в структуре и свойства стали/ Е.Г. Зарембо– Москва: ВИИИТ, 1990.
- 40 Стеклов О.И. Основы сварочного производства / О.И. Стеклов – Москва: Высшая школа, 1986. – 224 с.

- 41 Хренов К.К. Сварка, резка и пайка металлов / К.К. Хренов – Москва: Машиностроение, 1973. – 408 с.
- 42 Рокки К.С. Проектирование стальных мостов / К.С. Рокки, Х.Р. Эванс – Москва: Транспорт, 1996 – 245 с.
- 43 Знайтовар[Электронный ресурс]: СТО-ГК "Трансстрой" 012-2007 Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление. Режим доступа: [http://www.znaytovar.ru/gost/2/STOGK\\_Transstroj\\_0122007\\_Staln.html](http://www.znaytovar.ru/gost/2/STOGK_Transstroj_0122007_Staln.html).
- 44 [Электронный ресурс]: Материаловедение. Режим доступа [http://www.materialscience.ru/shared\\_folder/matved/books/Lahtin\\_leont'eva\\_matved](http://www.materialscience.ru/shared_folder/matved/books/Lahtin_leont'eva_matved).
- 45 Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева // Учебник для высших технических учебных заведений – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.
- 46 НовостаБарнаул[Электронный ресурс]: Мосты. Режим доступа: <http://www.barnaul-altai.ru/>.
- 47 [Электронный ресурс]: Применение алюминиевых сплавов в строительстве. Режим доступа: <http://vuz.exponenta.ru/pdf/book/alum/alumvs.html> .
- 48 [Электронный ресурс]: Все об алюминии. Режим доступа: <http://aluminiumleader.ru/>.
- 49 [Электронный ресурс]: Сварка мостов. Режим доступа: <http://www.aluart.spb.ru/>.
- 50 [Электронный ресурс]: Применение алюминиевых сплавов в строительстве. Режим доступа: <http://vuz.exponenta.ru/pdf/book/alum/alumvs.html>.
- 51 Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др] – Москва: Машиностроение, 1989. — 640 с.
- 52 Арзамасов В.Б. Материаловедение и технология конструкционных материалов /В.Б.Арзамасов, А.Н. Волчков [и др.]// Учебник для студентов высших учебных заведений. – Москва: Академия, 2009. – 448 с.
- 53 Сварка [Электронный ресурс]: Технология сварки титана и его сплавов. Режим доступа: <http://weldering.com/tehnologiya-svarki-titana-splavov>.

54 ГОСТ 27772-88 Прокат для строительных стальных конструкций –  
Введ. 01.01.1989. – Москва. – 3–10 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1– Химический состав металлических материалов в процентном соотношении

Марка стали	С	Mn	Si	Fe	Ni	S	P	Cr	Cu	N	As	Ti	V	Al	Mg	Zn	O	Другое
ВТ6	До 0,1	-	До 0,15	До 0,3	-	-	-	-	-	До 0,05	-	86,5- 91,2	3,5- 5,3	5,3- 6,8	-	До 0,3	До 0,2	0,5
16Г2АФ	0,14 – 0,2	1,3 – 1,7	0,3 – 0,6	~96	-	-	-	-	-	0,015- 0,025	-	-	0,08- 0,14	-	-	-	-	-
10ХСНД	До 0,12	0,5 – 0,8	0,8 – 1,1	~96	0,5 – 0,8	До 0,04	До 0,035	0,6 – 0,9	0,4 – 0,6	До 0,008	До 0,08	-	-	-	-	-	-	-
15ХСНД	0,12 – 0,18	0,4 – 0,7	0,4 – 0,7	~97	0,3 – 0,6	До 0,04	До 0,035	0,6 – 0,9	0,2 – 0,4	До 0,008	До 0,08	-	-	-	-	-	-	-
Д16	-	0,3 – 0,9	До 0,5	До 0,5	До 0,1	-	-	-	3,8 – 4,9	-	-	До 0,1	-	90,8- 94,7	1,2- 1,8	До 0,3	-	0,15
16Д	0,1 – 0,18	0,4 – 0,7	0,12 – 0,25	~98	До 0,3	До 0,04	До 0,035	До 0,3	0,2 – 0,35	До 0,008	До 0,08	-	-	-	-	-	-	-
Ст3	0,14 – 0,22	0,3 – 0,65	0,05 – 0,17	~97	До 0,3	Не более 0,05	0,04	До 0,3	До 0,3	До 0,008	До 0,08	-	-	-	-	-	-	-



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 –Стали по механическим и экономическим показаниям

Марка стали	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Относительное Удлинение $\delta$ , %	Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup> , при температуре, °С .			Стоимость за тонну, руб
				+20	-40	-70	
15ХСНД	480	330	21	-	0,30	-	64000
10ХСНД	530	390	19	-	0,39	0,29	69800
16Д	390	235	26	0,34	-	-	30800
ВТ6	885	410	8	0,35	-	-	1800000
Д16	400	280	10				282000
Ст3	380	240	25	0,18	-	-	33500
16Г2АФ	600	450	20	-	-	0,3	65000