

**Махутов Н.А.  
Еремин К.И.,  
Нащекин М.В.,  
Березкина Ю.В.**

**ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС  
ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ**

**Монография**

Магнитогорск, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	2
<b>Глава 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ БАЛОК</b>	3
1.1. Подкрановые балки предприятий металлургической, горно-рудной и теплоэнергетической промышленности	3
1.2. Мостовые перегружатели металлургических комплексов	6
1.3. Анализ условий эксплуатации мостовых перегружателей	20
1.4. Повреждаемость циклически нагруженных балок	24
<b>Глава 2. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ БАЛОК</b>	39
2.1. Ездовые балки мостовых перегружателей	39
2.2. Геодезические методы измерения деформированного состояния конструкций	57
2.3. Исследование перемещений ездовых балок при остановке мостового перегружателя	66
2.4. Моделирование НДС материала узлов ездовых балок мостовых перегружателей	77
<b>Глава 3. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЕЗДОВЫХ БАЛОК МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ</b>	95
3.1. Оценка остаточного ресурса узлов ездовых балок кранов-перегружателей при наличии в расчетном сечении трещин и трещиноподобных дефектов сварки	95
3.2. Учет инерционных воздействий при оценке остаточного ресурса на стадии роста усталостной трещины ездовых балок мостовых перегружателей при фактическом режиме эксплуатации	102
3.3. Пример расчета остаточного ресурса ездовых балок	114
3.4. Рекомендации по проведению осмотров и восстановительных ремонтов	117
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b>	123

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Мостовые перегружатели металлургических комплексов, как правило, эксплуатируются в течение продолжительного времени. При этом период эксплуатации может составлять 30-40 лет и более. Данные конструкции воспринимают эксплуатационные и технологические статические и циклические нагрузки и работают в условиях низких температур и агрессивных сред. За время эксплуатации ездовые балки мостовых перегружателей накапливают ряд дефектов, к которым можно отнести усталостные трещины в элементах ездových балок и в узлах крепления балок к несущим конструкциям. Причинами возникновения усталостных трещин являются начальные дефекты сварки (поры, подрезы, непровары, шлаковые включения и т.д.), а также циклический характер нагружения конструкций и изменившиеся условия эксплуатации. За время дальнейшей эксплуатации происходит рост усталостных трещин, зародившихся из дефектов сварки, что при достижении трещин «критических» размеров может привести к разрушению конструкций. Подобные разрушения связаны, как правило, с большими финансовыми потерями, нанесением ущерба окружающей среде и даже с человеческими жертвами. В связи с тем, что у большинства предприятий отсутствует возможность замены кранов на новые, возникает необходимость оценить опасность выше указанных дефектов, разработать методику оценки остаточного ресурса ездových балок существующих мостовых перегружателей, разработать рекомендации и приемы усиления данных конструкций, а также разработать ряд мероприятий по дальнейшей эксплуатации ездových балок мостовых перегружателей, подверженных усилению.

Оценить остаточный ресурс ездových балок, имеющих усталостные повреждения, возможно при использовании математических моделей механики разрушения [18, 109].

Механика разрушения дает возможность оценить ресурс различного рода конструкций, содержащих трещины, а также позволяет строить зависимости, связывающие остаточный ресурс конструкции с размерами дефекта.

Вопросам оценки ресурса сварных конструкций на стадии роста усталостной трещины с позиции механики разрушения посвящено большое количество исследований и многочисленные публикации последнего времени.

Однако, в настоящее время проблему нельзя считать полностью изученной.

# Глава 1.

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ БАЛОК

### 1.1. ПОДКРАНОВЫЕ БАЛКИ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ, ГОРНО-РУДНОЙ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Подкрановые конструкции являются одними из самых ответственных элементов, входящих в каркас промышленных зданий. Данные конструкции включают в себя подкрановые балки, тормозные балки либо фермы, узлы крепления подкрановых балок между собой и к колоннам, узлы крепления тормозных конструкций к колоннам, крановые рельсы, крановые упоры.

Из всей совокупности подкрановых конструкций, наиболее подвержены возникновению повреждений подкрановые балки, находящиеся в сложных условиях работы. При этом, повреждения в подкрановых балках возникают уже в течение первых лет эксплуатации: происходит разрушение узлов крепления тормозных конструкций, узлах крепления балок к колоннам и балок между собой, появляются усталостные трещины в сварных швах, а также в основном металле стенок в районе верхнего пояса, в клепанных балках происходит ослабление заклепок, возникают трещины в уголках. По мере дальнейшей эксплуатации происходит прогрессирующий рост повреждений, что значительно влияет на безопасную эксплуатацию подкрановых конструкций.

Наиболее подвержены накоплению повреждений подкрановые балки цехов металлургической, горнорудной и теплоэнергетической промышленности.

Как показали результаты натурных обследований 140 многопролетных цехов, повреждения в подкрановых балках возникают повсеместно, особенно при наличии кранового оборудования, работающего в тяжелых и весьма тяжелых условиях.

Для обследованных зданий цехов, относящихся к объектам металлургической и горнорудной промышленности, характерны многопролетность и протяженность в плане. Годы постройки зданий 40-е – 90-е годы XX века. По конструктивному решению, здания имеют, как правило, металлический каркас, однако, в зависимости от технологических процессов, каркасы могут быть смешанные. Протяженность в плане достигает 1000 м, размеры пролетов кратны 6 м, но зачастую, встречаются пролеты размером 27, 33 м и т.д. Полезная высота пролетов, как правило, не превышает 20 м. Стальные несущие конструкции сварные, подкрановые конструкции как сварные, так и клепаные. Шаг колонн по крайним рядам 6 м, по средним – 12 или 18 м. Подкрановые балки сварные либо клепанные двутаврового сечения. Основной класс применяемой стали С245, значительно реже встречаются каркасы зданий, выполненные из стали класса С345 и это характерно для зданий 70–80-х годов постройки XX века. Здания расчленяются на температурные блоки продольными и поперечными температурными швами. Пролеты цехов оборудованы продольными светоаэрационными фонарями. Колонны ступенчатые, сквозные в подкрановой части и сплошные в надкрановой. Соединительная решетка треугольная с дополнительными распорками. Стропильные трапече-

идальные с треугольной системой решетки, с дополнительными стойками и подвесками. Дополнительная решетка – шпренгельная.

Пролеты оборудованы мостовыми кранами с гибким подвесом груза с широким диапазоном по грузоподъемности до 150 т и режимами работы от 3К до 7К и 8К.

Стеновое ограждение выполнено из стеновых трехслойных железобетонных панелей, в зданиях 40 – 50-х годов применены самонесущие кирпичные стены. Плиты покрытия железобетонные ребристые. На рис. 1.1 и 1.2 приведены примеры каркасов обследованных зданий.

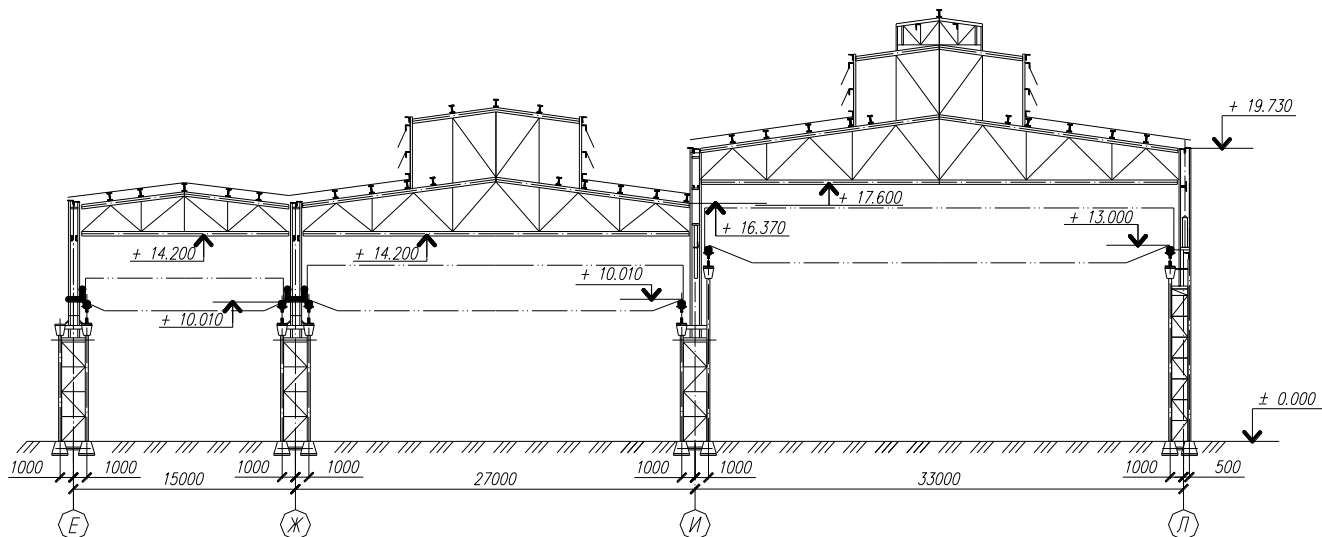


Рис. 1.1. Поперечный разрез прокатного отделения листопркатного цеха металлургического комбината

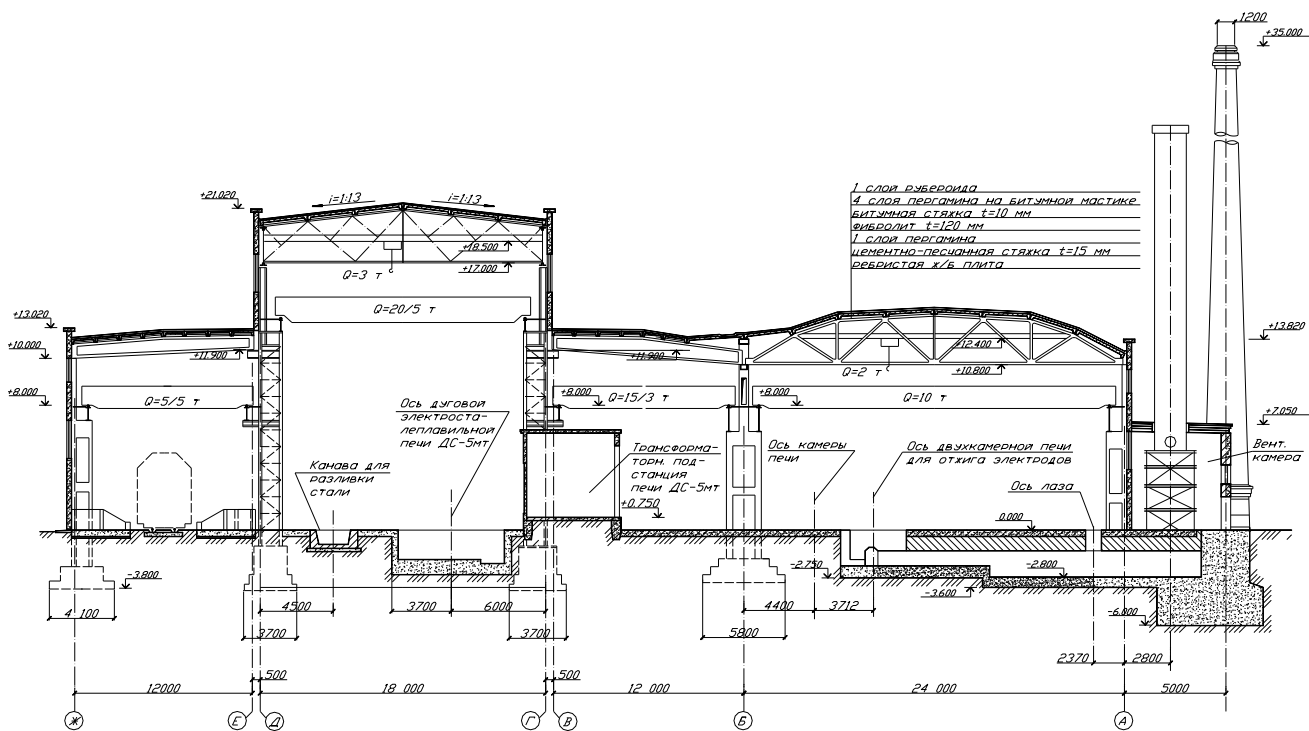


Рис. 1.2. Поперечный разрез электросталеплавильного цеха металлургического завода

Главные корпуса ЦЭС теплоэнергетической промышленности имеют сложную конфигурацию в плане и по высоте. Для каркасов зданий характерны повышенная высотность от 50 до 80 м и большие пролеты до 50 м.

Корпуса скомпонованы из четырех основных пролетов: центрального блока, состоящего из деаэрационного и бункерного отделений и примыкающих к центральному блоку с одной стороны машинного зала, с другой – котельного отделения.

Здания имеют металлические либо смешанные каркасы. Стальные конструкции сварные или клепанные. Пролеты машинного и котельного отделений оборудованы продольными светоаэрационными фонарями. Шаг колонн по крайним рядам 6 м, по средним – 9, 12 м. Подкрановые балки сварные, клепанные симметричного двутаврового сечения.

Железобетонные колонны – монолитные ступенчатые, постоянного либо переменного по высоте сечения. Стропильные фермы, как правило, трапецеидальные, полупортального типа. Система решетки треугольная с дополнительными стойками, шпренгельная. Металлические колонны средних рядов – сварные двухступенчатые, сквозного сечения в подкрановой части. Вертикальные связи между колоннами – крестовые

Пролеты оборудованы мостовыми кранами с гибким подвесом груза грузоподъемностью от 30 до 100 т и режимами работы от 3К до 5К.

Пример каркаса обследованных зданий предприятий теплоэнергетической промышленности приведен на рис. 1.3.

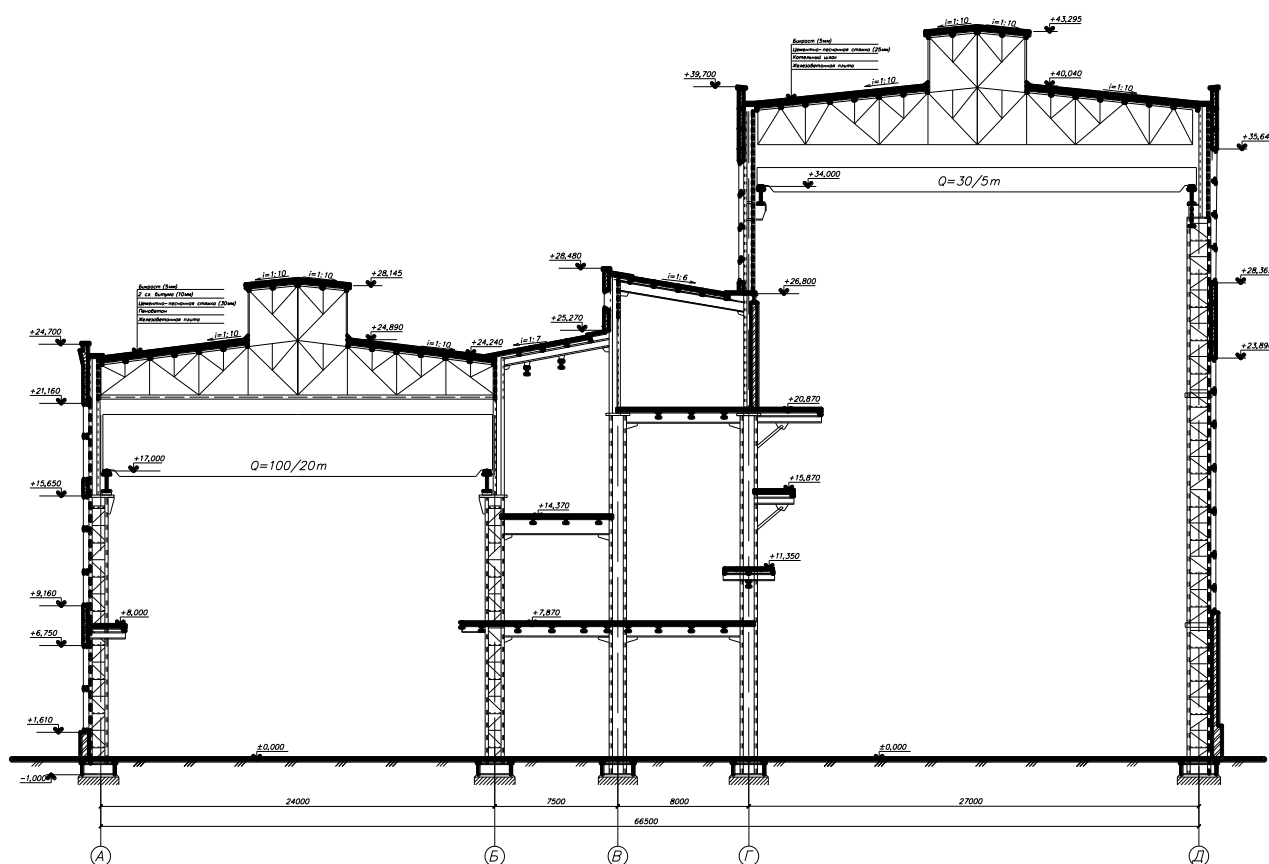


Рис. 1.3. Поперечный разрез котлотурбинного цеха ГРЭС

## 1.2. МОСТОВЫЕ ПЕРЕГРУЖАТЕЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Мостовые перегружатели предназначены для выполнения подъемно-транспортных операций с сыпучими материалами: в доменных цехах металлургических заводов – для складирования и усреднения руды; на угольных складах – для аналогичных операций с углем; на цементных заводах – с сырьевыми материалами.

Пролеты мостовых перегружателей достигают 70 – 80 м, а в некоторых случаях и более 100 м.

Мостовые перегружатели, применяемые в промышленности, с точки зрения металлических конструкций можно классифицировать по следующим признакам [1, 2, 10, 30, 76]:

1. Поперечное сечение моста: замкнутого (рис.1.4, а) или П-образного типа (рис.1.4, б) в решетчатом или листовом исполнении.

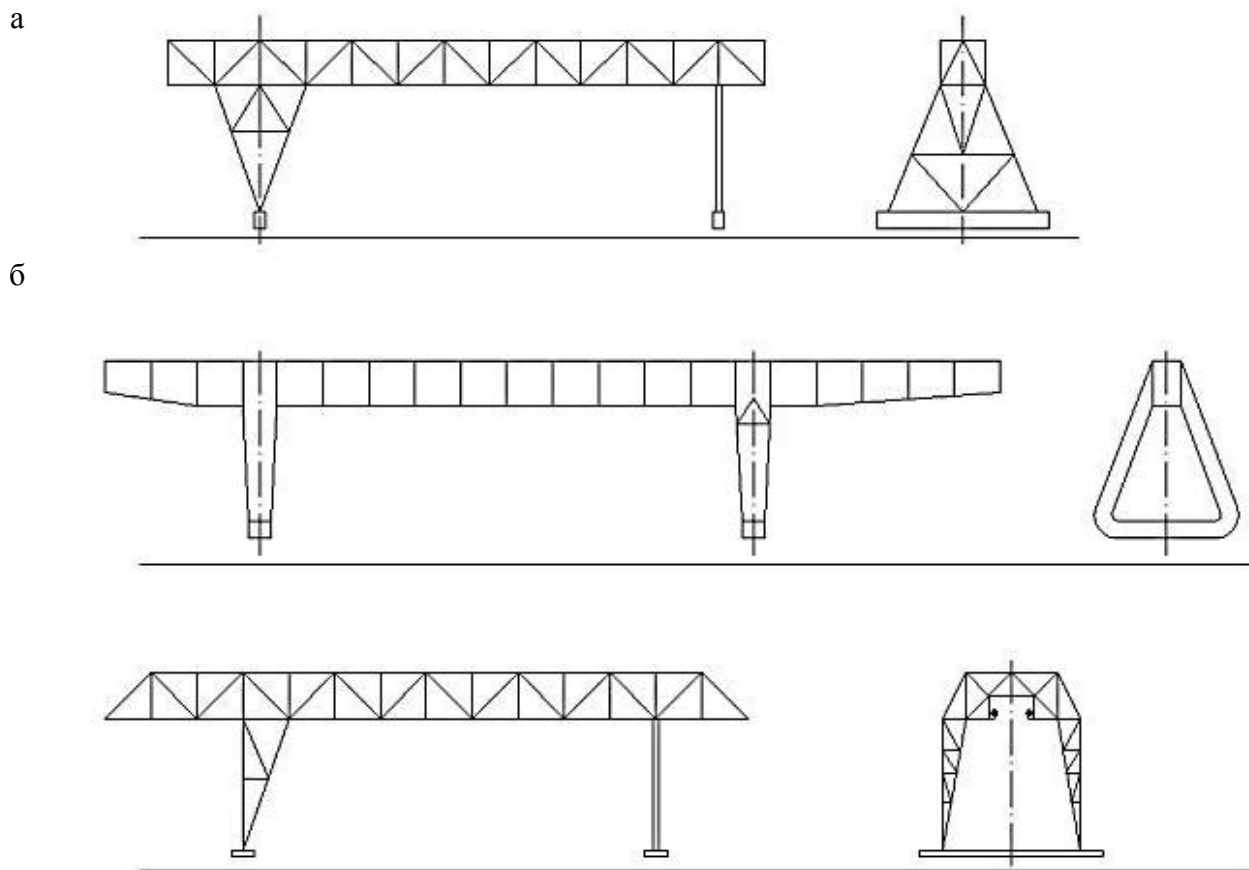


Рис. 1.4. Типы мостов с замкнутым (а) и П-образным (б) поперечным сечением

Мосты с замкнутым прямоугольным сечением в решетчатом исполнении имеют две вертикальные главные фермы, в плоскости верхних и нижних поясов соединенные связями вдоль всего моста, с рамными раскосами в сечениях, где расположены стойки ферм (рис.1.5). Рамные раскосы служат для обеспечения неизменяемости поперечного сечения. В листовом исполнении (рис.1.6) коробчатое сечение моста имеет внутренние диафрагмы, располагающиеся примерно на таких расстояниях, как и рамные раскосы в решетчатой конструкции.



Рис. 1.5. Ездовые балки двутаврового сечения мостового перегружателя №2 коксохимического производства (КХП ОАО «ММК»)



Рис. 1.6. Ездовые балки коробчатого сечения мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК»

Существуют конструкции мостовых перегружателей с трубчатым строением моста (рис.1.7) с двумя консолями, опирающиеся на две трубчатые опоры. Поперечные диафрагмы представляют собой замкнутое кольцо, состоящее из стенки с окантовкой. Под каждой диафрагмой с нижней стороны трубы приваривается поперечная балка, к консолям которой крепятся ездовые балки.

Мосты с П-образным сечением в решетчатом исполнении имеют две вертикальные главные фермы (рис.1.8), в плоскости верхних поясов соединенные связями вдоль всего моста. Тележки перемещаются по подрельсовым балкам. Для передачи нагрузки от тележки и подрельсового пути на главные фермы моста, а также для придания сечению моста жесткой неизменяемой формы служат поперечные рамы, имеющие форму портала и являющиеся поперечными связями. В плоскости подрельсового пути имеются две горизонтальные фермы связей.

В горизонтальных плоскостях размещаются горизонтальные (ветровые) связи. Вертикальные и горизонтальные плоскости соединяются между собой поперечными связями (поперечными рамами).

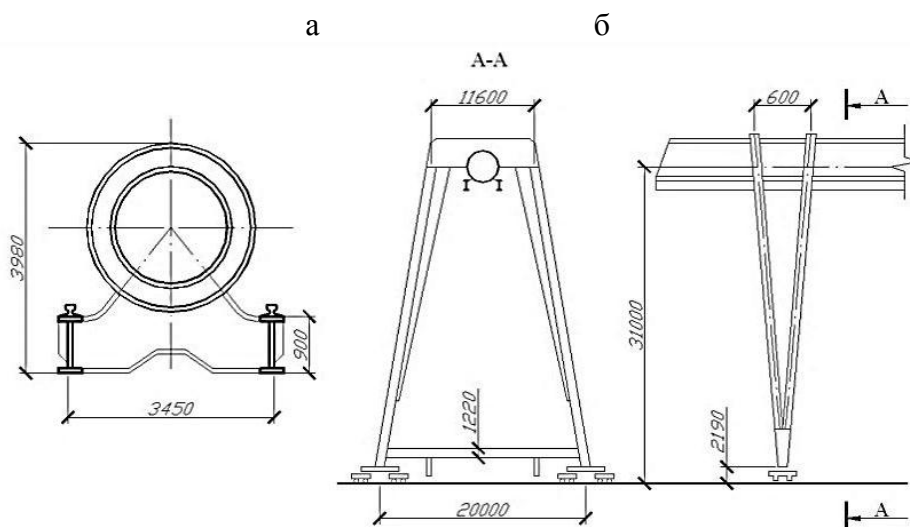


Рис. 1.7. Перегрузатель трубчато-балочной конструкции: а – поперечное сечение в пролете и на свободной консоли; б – опора



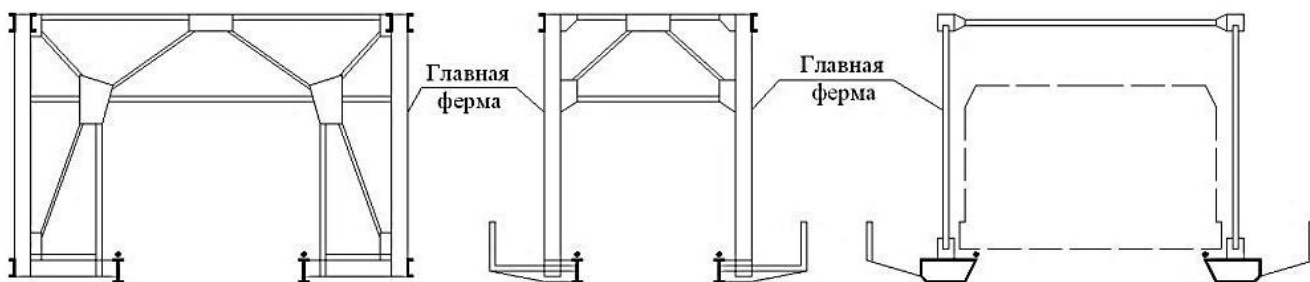


Рис. 1.8. Схемы рам П-образного сечения

При размещении грузовых тележек по специальным ездовым балкам, размещенным в плоскости нижнего пояса пролетного строения, основные горизонтальные связи размещаются только в плоскости верхнего пояса. Снизу пролетное строение остается открытым.

2. Общая конструкция моста:

- а) без консолей;
- б) с одной консолью или двумя жесткими консолями;
- в) с подъемной консолью.

Обычно мостовые перегружатели имеют одну или две консоли, так как мост с консолями легче моста той же длины, но без консолей. Решение вопроса о надобности консолей определяется местными условиями и требованиями обслуживаемого процесса.

Подъемной консолью снабжаются портовые мостовые перегружатели. Причальные перегружатели для перегрузки контейнеров выполняются с подъемной или стационарной надводной консолью и строятся грузоподъемностью на захвате 20, 32 и 40 т.

В зависимости от типа конструкции моста мостовые перегружатели подразделяют на краны с решетчатыми, вантовыми, трубчатыми и коробчатыми мостами.

3. Характер соединения опор с мостом в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

- а) жесткое соединение;
- б) шарнирное соединение;
- в) шарнирное соединение с возможностью косо устанавливать мост.

В вертикальной плоскости обычно одна опора присоединяется к мосту шарнирно и называется гибкой опорой, а другая – жестко и называется жесткой опорой. В вертикальной плоскости гибкая опора присоединяется к мосту с помощью цилиндрических шарниров. Такая схема применяется для того, чтобы исключить влияние на конструкции распора, который может возникать при действии температуры, вызывающей удлинение пролетного строения и отклонений в положении подкрановых путей. Высота опор определяется высотой подъема захватного органа либо местными условиями. База моста (ширина опор) в плоскости, перпендикулярной мосту, должна быть достаточна для нормальной работы его при передвижении, для устойчивости против опрокидывания и у мостов с сечением П-образного типа – для создания в опорах необходимых размеров для проезда тележки. Отношение пролета к базе в зависимости от высоты опор принимается одинаковым для обеих опор но не более  $4 \div 6$ . Конструкции опор зависят от типа поперечного сечения моста и характера соединения опор с мостом в горизонтальной плоскости.

Современные конструкции мостовых перегружателей имеют в горизонтальной плоскости шарнирное соединение опор с мостом для возможности забега одной из них. Для этого

жесткая опора присоединяется к мосту в горизонтальной плоскости при помощи цилиндрического шарнира, а гибкая - при помощи шарового.

Величина угла перекоса обычно составляет  $6^0$ . При шарнирном соединении опор в горизонтальной плоскости с мостом боковое давление колес на подкрановый рельс примерно вдвое меньше, чем при их жестком соединении, значит мост и жесткая опора могут быть выполнены более легкими.

4. Характер передвижения:

- а) по параллельным путям;
- б) по параллельным путям с переходом на перпендикулярные пути;
- в) по круговому рельсу с вращением вокруг неподвижной колонны.

Мостовые перегружатели перекрывают площади шириной до 200 м, причем собственный вес мостовых перегружателей достигает свыше 1500 тс. Таким образом, мостовые перегружатели относятся к наиболее тяжелым передвижным крановым сооружениям с преобладающим весом в них металлических конструкций, достигающим до 80 - 85% от общего веса сооружения.

Основным материалом для изготовления металлических конструкций мостовых перегружателей является низколегированная сталь для тяжело нагруженных элементов и сталь марки ВМ СтЗсп для остальных рабочих элементов.

Для исследования выбраны мостовые перегружатели Магнитогорского и Орско-Халиловского металлургических комбинатов, а также Петропавловской ТЭЦ-2 (Республика Казахстан).

Мостовые перегружатели служат для перемещения угля. Поступающий по железной дороге уголь высыпается в яму с помощью передвижных вагоноопрокидывателей, затем забирается грейфером и разгружается на складские места. В случае необходимости уголь забирается из этих штабелей и доставляется к находящимся на рельсовых путях вагонам, которые загружаются с помощью перегрузочной воронки.

Выбранные для исследований мостовые перегружатели можно условно разделить на два типа: мостовые перегружатели с решетчатой несущей конструкцией и комбинированной (балочно-висячей) системой.

К первому типу относятся мостовые перегружатели №1, 2, 3 КХП ОАО «ММК» (рис. 1.9, 1.10, 1.11, 1.15).

Угольные мостовые перегружатели №1, 2, 3 пролетом 67 м рассчитаны на грузоподъемность 30 т (рис. 1.9, 1.10, 1.11, 1.15).

Несущие конструкции моста и опор выполнены методом клепки. Мост перегружателя состоит из двух главных ферм с горизонтальным нижним поясом и верхним поясом полигонального очертания. Решетка главных ферм треугольная с дополнительными стойками и подвесками. Мост перегружателя раскреплен поперечными рамами, шаг которых совпадает с шагом узлов главных ферм. Кран-перегрузатель оборудован двумя тележками, которые перемещаются по путям с шириной колеи 2910 мм. Ездовые балки располагаются в уровне нижних поясов главных ферм и крепятся к узлам поперечных рам посредством жестких вертикальных диафрагм. Пролетное строение опирается на пространственную жесткую и на плоскую гибкую опоры. Протяженность консоли со стороны жесткой опоры – 41 м, а со стороны гибкой опоры – 35 м. Ко второму типу относятся мостовые перегружатели №4, 5, 6 КХП ОАО «ММК».

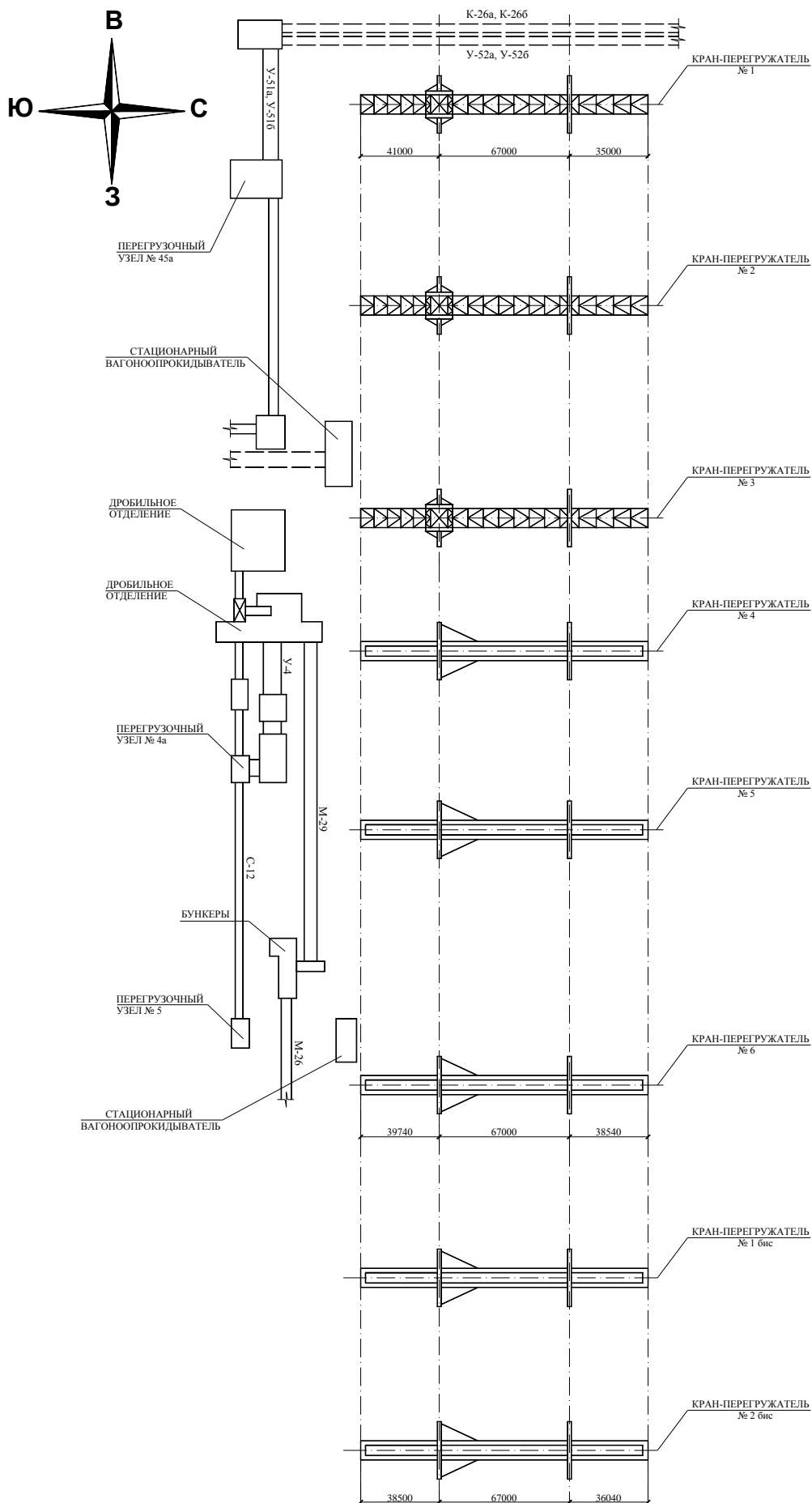


Рис. 1.9. Схема расположения мостовых перегружателей КХП ОАО «ММК»

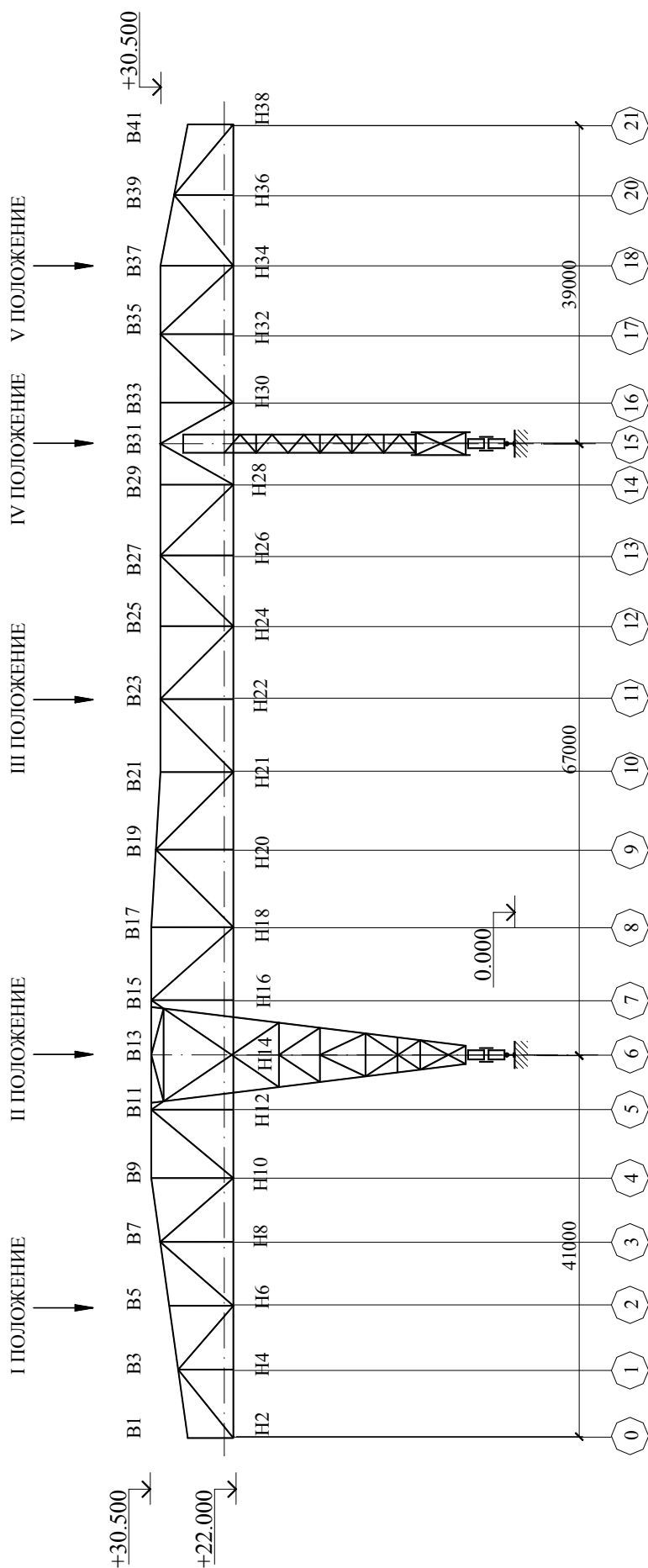


Рис. 1.10. Мостовой перегрузагль №1 КХП АО «РМК»

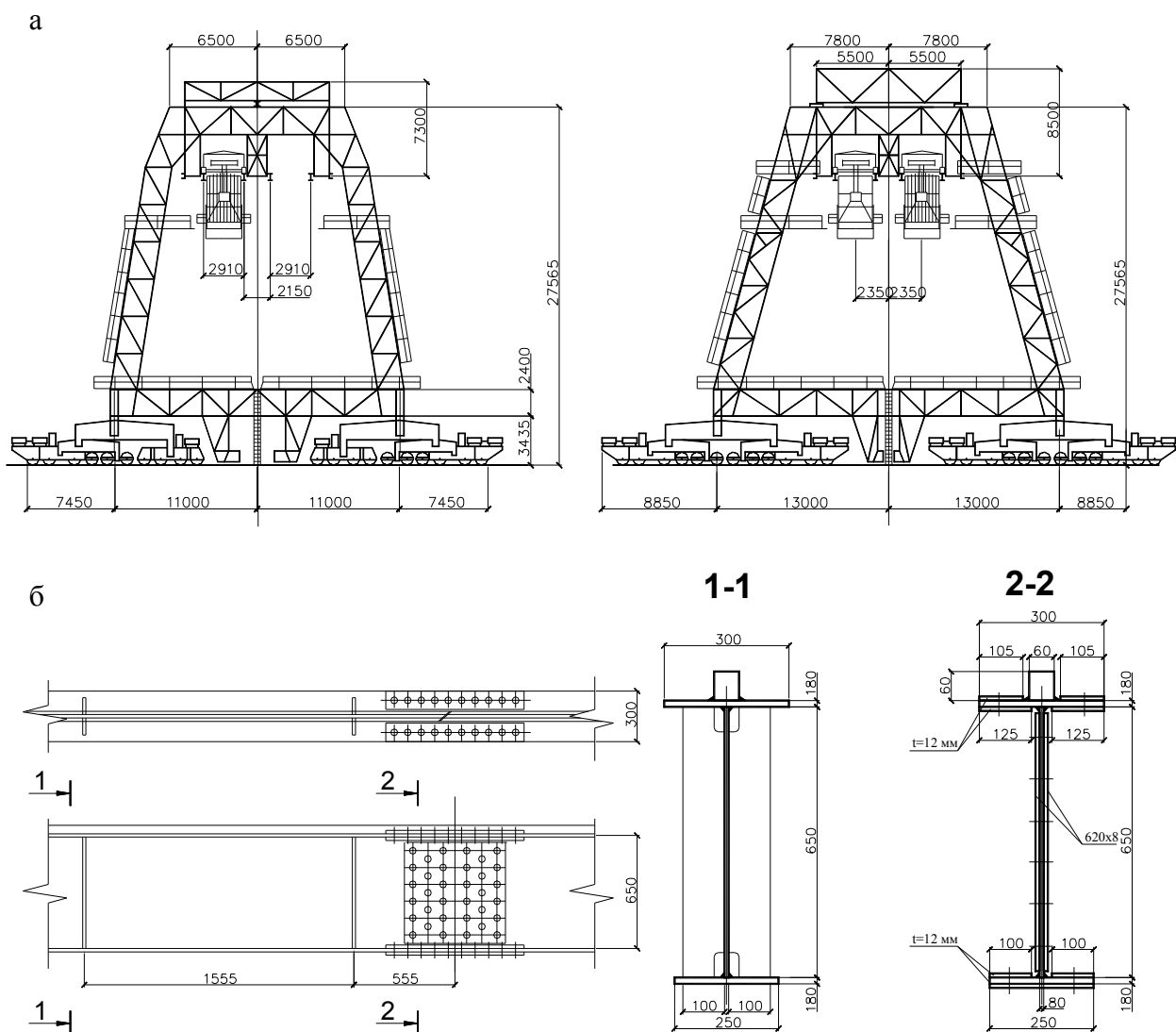


Рис. 1.11. Характерные узлы мостового перегружателя №1 КХП ОАО «ММК»: а – жесткая и гибкая опоры; б – фрагмент ездовой балки

Мостовые перегружатели №4, 5 и 6 комбинированной шпренгельной системы завода ВТА (ГДР) эксплуатируются с 1971-1972 годов (рис. 1.12-1.15).

Основные размеры мостовых перегружателей:

- пролет – 67 м;
- консоль со стороны гибкой опоры – 38,54 м;
- консоль со стороны жесткой опоры – 39,74 м;
- коlea подтележечных рельсов – 3,55 м;
- отметка головки подтележечного рельса – 27,914 м.

Ездовые балки сварные коробчатого сечения. Соединение стенки с верхним поясом под рельсами усилено наклонными ламелями.

Опоры выполнены в виде трапецидальной рамы со стойками коробчатого сечения.

Мостовые перегружатели оборудованы грейфером грузоподъемностью  $Q = 32$  т.

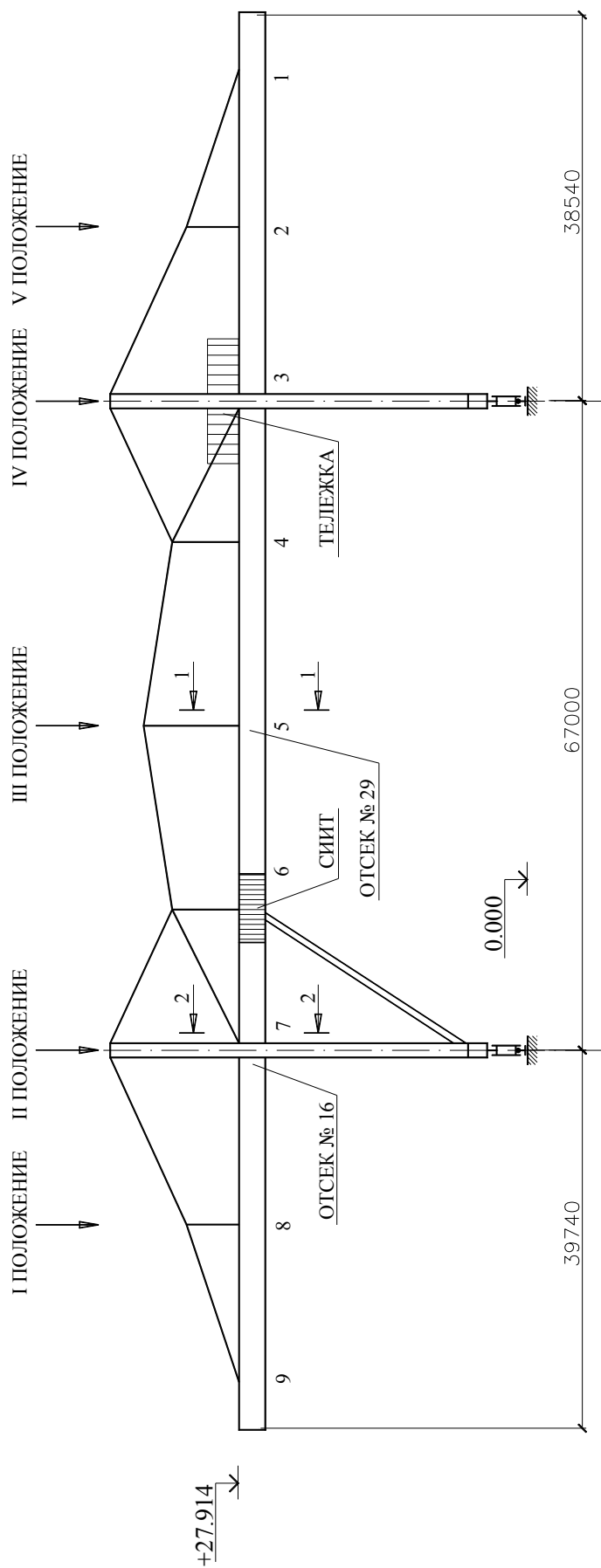


Рис. 1.12. Мостовой перегружатель №4 КХП ОАО «ММК»

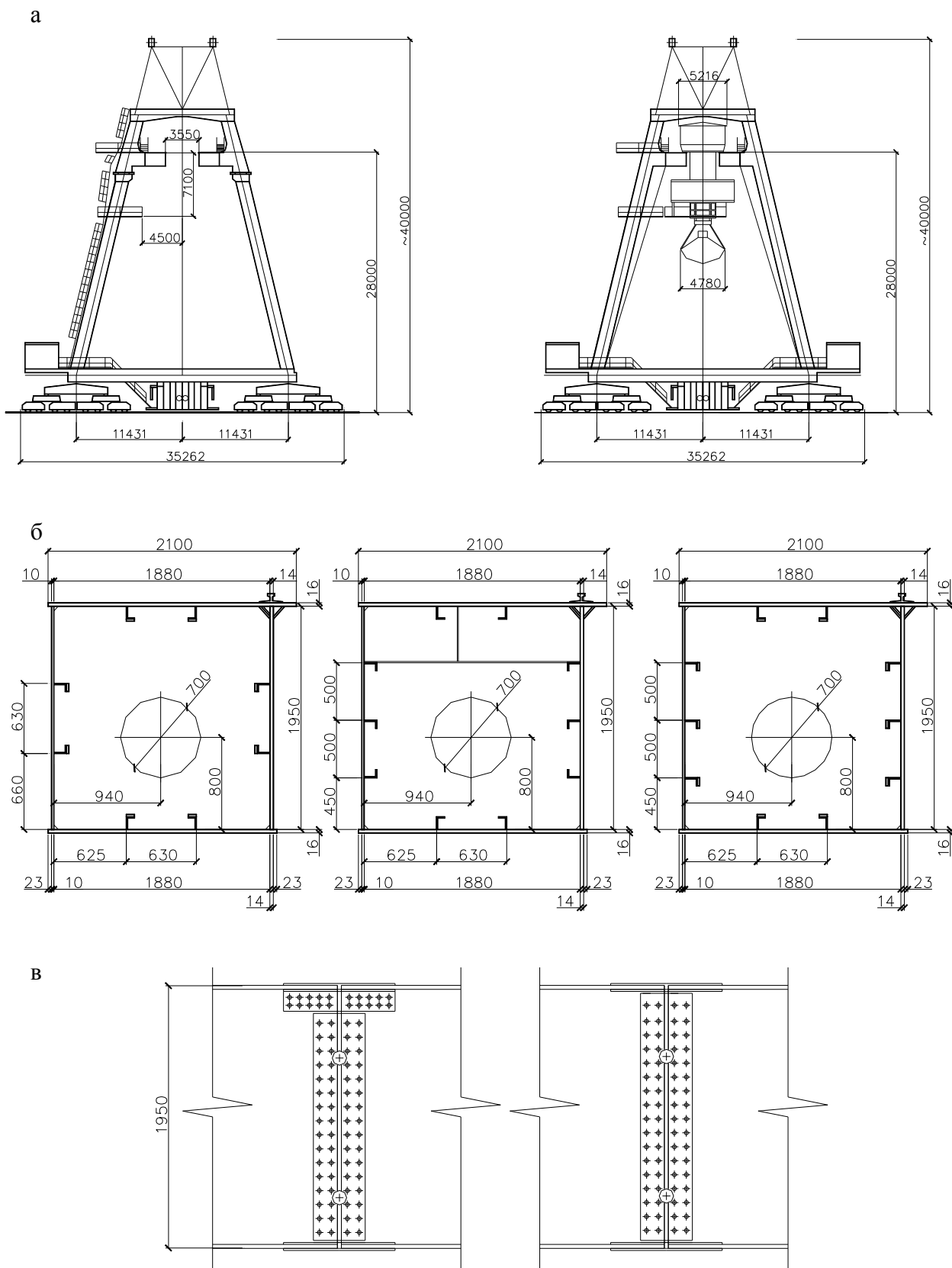


Рис. 1.13. Характерные узлы мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК»:  
 а – жесткая и гибкая опоры; б – сечения ездовой балки;  
 в – монтажный стык

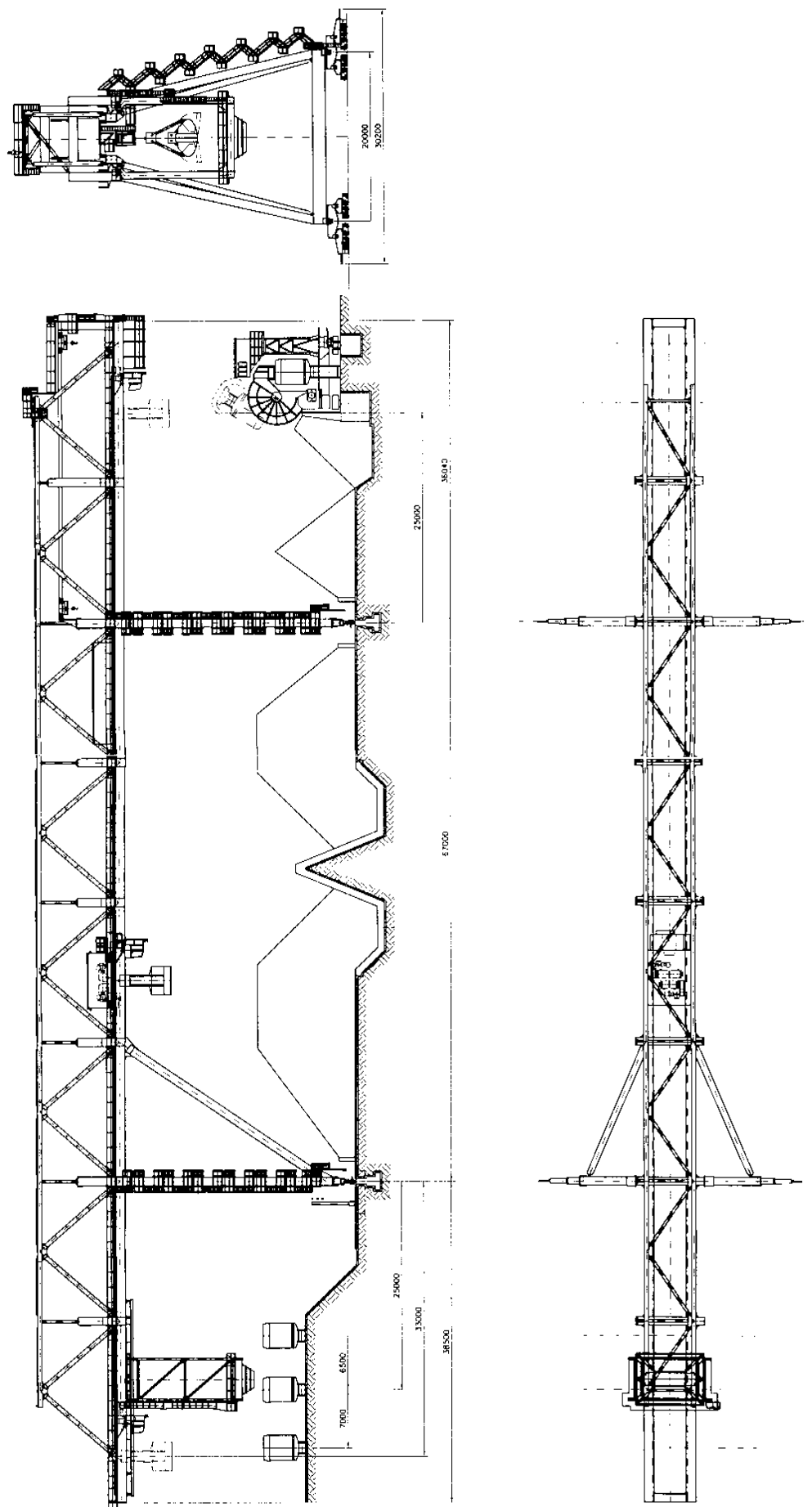


Рис. 1.14. Схема мостовые перегружатели №№1 бис, 2 бис УПЦ КХП ОАО «ММК»





Рис. 1.15. Мостовые перегружатели  
КХП ОАО «ММК»:  
а – решетчатой;  
б – комбинированной системы

Пролет мостовых перегружателей №1бис, 2бис составляет 67 м, вылет консоли со стороны жесткой опоры - 38,50 м, гибкой опоры - 36,04 м.

Отметка оголовки подтележного рельса составляет +28,000, ширина колеи тележки - 2,90 м. Грузоподъемность тележки  $Q=32$  т, емкость грейфера – 16 м<sup>3</sup>. Металлические конструкции мостового перегружателя состоят из пролетного строения, жесткой и гибкой опор.

Пролетное строение мостового перегружателя представляет собой пространственную решетчатую систему, образованную двумя вертикальными главными фермами, поперечными П-образными рамами с подкосами и горизонтальной связевой фермой, расположенной в уровне верхних поясов главных ферм.

Главные фермы – сварные с параллельными поясами. Система решетки треугольная. Ездовые балки замкнутого коробчатого сечения. Высота ездых балок – 1271 мм, ширина – 950 мм. Поперечное сечение верхних полок – 1110×25 мм, нижних – 980×16 мм, стенок 1230×10 мм. Внутри ездых балок установлены диафрагмы с отверстиями и продольные ребра жесткости.

Шаг диафрагм составляет 1,95 м, в местах расположения поперечных рам – 0,95 м. Ширина овальных отверстий в диафрагме составляет 400 мм, высота – 600 мм. Толщина диафрагм – 10 мм. Продольные ребра жесткости установлены в средних частях стенок, выполнены из гнутого швеллера 100×50 мм.

Грейферная тележка перемещается по ездovým балкам, на верхнем поясе которых строго над вертикальной стенкой устанавливается подтележный рельс КР120. Способ крепления рельсов к ездovým балкам моста и между собой исключает продольное и поперечное смещение, а также предусматривает их простую замену для ремонтных нужд. Ездовые балки между собой соединены порталными рамами, установленными в узлах решетчатой конструкции и обеспечивающими свободное прохождение грузовой тележки.

Крепление обеих опор к мосту – жесткое. Жесткая опора отличается от гибкой наличием подкосов. Стойки нижних частей каждой из опор соединены ходовой балкой, по краям которой установлены балансиры механизмов передвижения крана, а в средней части - противоугонное устройство.

Сечения всех элементов мостового перегружателя - коробчатое сварное из листовой стали марки 09Г2С толщиной от 6 до 25 мм. Монтажные соединения металлоконструкции - подготовленные сварные и болтовые соединения, выполненные на высокопрочных болтах.

Кран оборудован двумя гидравлическими рельсовыми захватами, и четырьмя механическими противоугонными устройствами, а также системой ограничения перекоса автоматического действия при передвижении.

Каждый из этих самозажимных захватов имеет пару эксцентриковых кулачков, вращающихся вокруг вертикальной оси. Открывание захвата осуществляется гидравлическим устройством а, замыкание – действием пружины. Гидравлическое устройство оборудовано клапаном выдержки времени, обеспечивающим остановку крана в момент перед закрытием рельсового захвата.

Механическое противоугонное устройство закрывается и открывается при помощи рукоятки. Система электрического управления автоматизирована. При остановке рабочих механизмов обороты двигателей падают до нуля, а затем срабатывают дисковые тормоза.

Кран-перегрузчик Петропавловской ТЭЦ-2 имеет пролет 60 метров и общую протяженность 100 метров, грузоподъемность  $Q = 25$  т (рис.2.7). Для Петропавловской ТЭЦ-2 Казахской ССР кран изготовлен в соответствии с техническим заданием Старо-Краматорским машиностроительным заводом им. С. Орджоникидзе в 1964 году и установлен на складе угля в 1965 году. Все несущие конструкции крана выполнены клепаными. Пролетное строение крана имеет параллельные пояса и треугольную решетку с дополнительными стойками и подвесками. Ездовые балки располагаются в плоскости нижних поясов главных ферм, выполнены в виде составных двутавров и крепятся к каждому узлу фермы посредством вертикальных диафрагм. Пролетное строение опирается на пространственную жесткую опору в четырех точках и на плоскую (гибкую) опору.

Рудничный кран-перегрузчик №1 ОХМК имеет пролет 76,35 метров и общую протяженность 145,35 метров, грузоподъемность  $Q = 9,8$  т (рис. 1.16).

Для Доменного цеха ОХМК кран изготовлен в соответствии с техническим заданием в 1954 году и установлен на складе руды в том же году. Все несущие конструкции моста выполнены клепанными. Пролетное строение мостового перегружателя имеет параллельные пояса и треугольную решетку с дополнительными стойками и подвесками (см. рис. 1.16). Ездовые балки располагаются в плоскости нижних поясов вертикальных главных ферм и выполнены в виде составных двутавров и крепятся к каждому узлу фермы посредством вертикальных диафрагм на заклепках. Пролетное строение опирается на пространственную жесткую опору в четырех точках и на плоскую (гибкую).

Техническая характеристика мостового перегружателя:

- колея крановых путей – 76,35 м;
- длина консоли со стороны жесткой опоры – 32 м;
- длина консоли со стороны гибкой опоры – 37 м;
- крайнее расчетное положение оси грейфера при выходе на консоль жесткой опоры – 16,5 м.

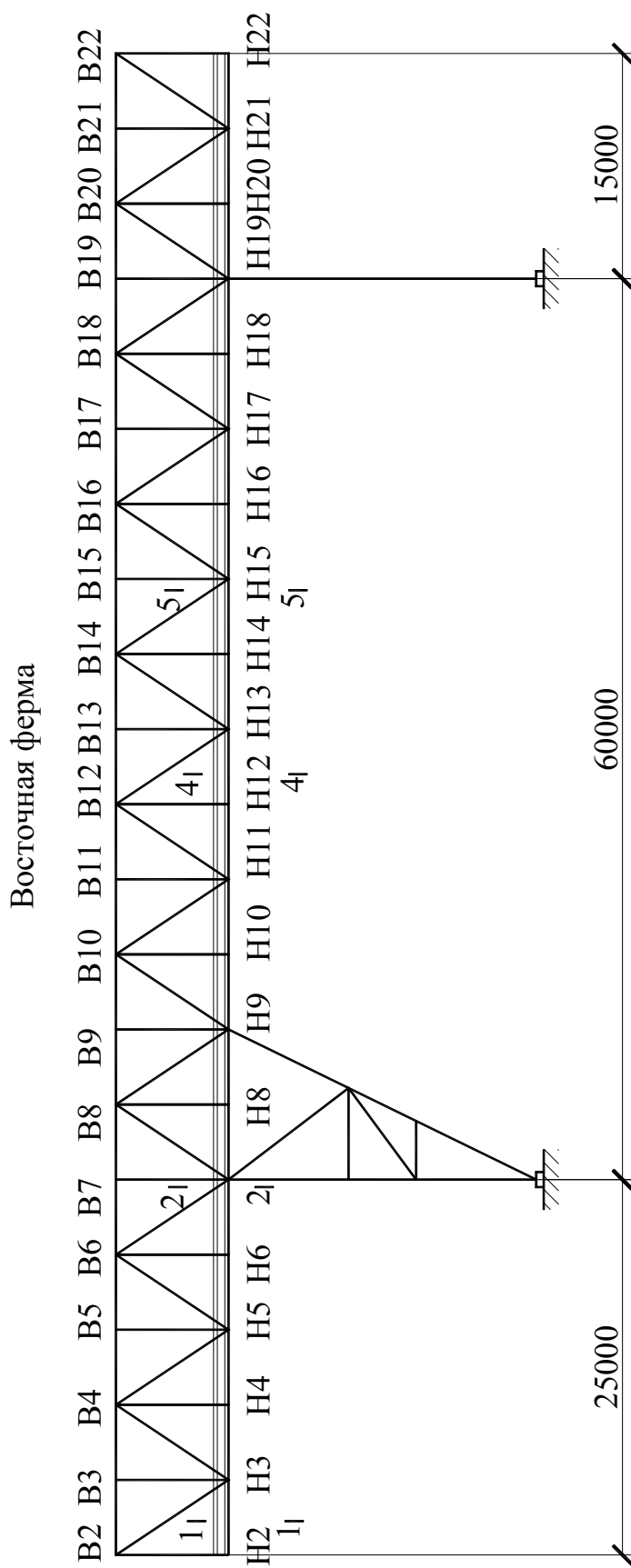


Рис. 1.16. Кран-перегрузжатель Петропавловской ТЭЦ-2

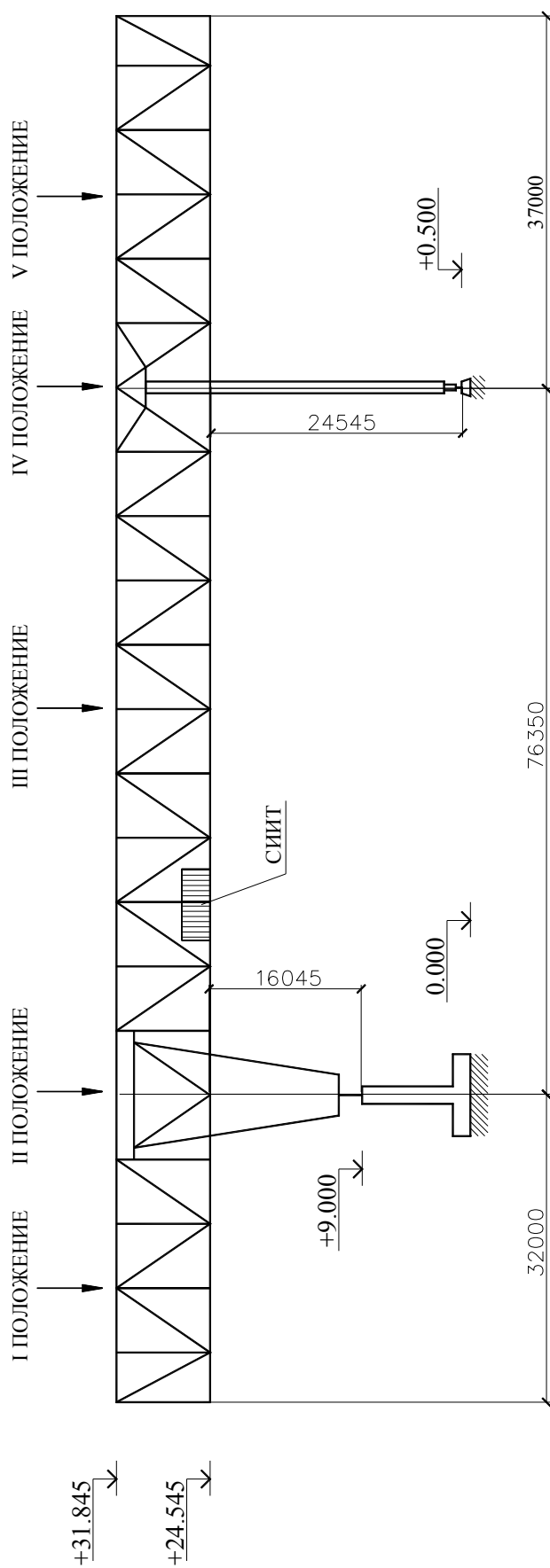


Рис. 1.17. Кран-перегрузатель Орско-Халиловского металлургического комбината

### 1.3. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

На протяжении всего периода эксплуатации мостовые перегружатели испытывают большое количество разнообразных воздействий [1, 2, 10, 11, 21, 31, 32, 70, 77, 84, 110, 127]: силовые (собственный вес конструкций, ветровое давление, эксплуатационные силовые факторы); динамические (от движения и торможения тележки и крана, от поднятия и перемещения груза, от порывов и пульсации ветрового давления, от усилий вызванных собственными колебаниями конструкций); коррозионные (от атмосферных явлений, от наличия в атмосфере агрессивных газов, а также запыленности воздуха и воздействий угольной пыли).

Основными силовыми воздействиями на несущие элементы мостовых перегружателей являются постоянные и временные нагрузки, которые в свою очередь можно разделить на длительные, кратковременные и особые.

На рис. 1.18 представлена схема нагрузок и воздействий на мостовой перегружатель.

Наибольший вклад в напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов главных ферм и опор мостового перегружателя вносит собственный вес стальных конструкций, а также динамические воздействия.

Давление от массы металлоконструкций грейферной тележки, оборудования и груза передается на подтележечный рельс через ходовые колеса.

Горизонтальные продольные и поперечные нагрузки, возникающие при передвижении грейферной тележки в период пуска и торможения, прикладываются на уровне головки подтележечных рельсов.

При передвижении перегружателя в период пуска и торможения, а также в следствии толчков и ударов возникают инерционные силы. Инерционные силы от веса металлоконструкций и оборудования приложены в центрах тяжести соответствующих узлов, а от веса грейферной тележки – на уровне головки рельсов подтележечных путей.

Снеговые нагрузки определяются по горизонтальной проекции воспринимающей поверхности. Гололед образуется, когда температура близка к нулю при медленном замерзании капель от соприкосновения их с предметами, имеющими более низкую температуру. Гололед образует на оттяжках и канатах, а также на металлических конструкциях, корку толщиной  $\pm 1,2$  см. Снеговые и гололедные нагрузки, как правило, не учитываются.

Температурные воздействия, вызываемые удлинением или укорочением элементов конструкций при колебаниях температуры, учитываются только при расчете статически неопределимых систем. Начальной температурой является температура создания статически неопределимой системы, т.е. температура заводского изготовления или монтажа (в среднем может приниматься  $+10^{\circ}\text{C}$ ). Крайние пределы колебания температуры считается  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ , если не оговорены другие значения.

При расчетах полезная нагрузка, в большинстве случаев, прикладывается в уровне ездовых балок, на которых установлены рабочие или ремонтные площадки для обслуживания мостовых перегружателей.

Монтажные нагрузки обусловлены спецификой возведения мостовых перегружателей и носят кратковременный характер. В настоящей работе данные нагрузки не рассматриваются.



Рис. 1.18. Схема нагрузок и воздействий на мостовые перегружатели

К категории особых нагрузок относятся воздействия, связанные чаще всего с временной неисправностью или отказом систем ограничения, а также отклонением нормального режима работы или же стихийными и чрезвычайными ситуациями.

Напряжения, возникающие в ездовых балках при эксплуатации, переменны во времени при превышении ими определенного предела в материале протекает процесс постепенного накопления повреждений, приводящий к образованию трещин, их развитию и окончательному разрушению. Этот процесс называют усталостью металла, а соответствующее разрушение – усталостным.

Ездовые балки мостовых перегружателей воспринимают динамические воздействия грейферных тележек, поэтому при их разборке обязателен учет циклического характера нагружения.

Ездовыми балками должен восприниматься весь комплекс усилий: динамические, подвижные импульсы от грейферных тележек, нагрузки от собственного веса, людей и ремонтных материалов на конструкциях и площадках, температурные и ветровые воздействия (под импульсом понимается кратковременное приложение силы в течение короткого промежутка времени [127]).

Наибольшие размахи напряжений при циклическом нагружении возникают при загрузке конструкций грейферной тележкой с грузом (так называемая изгибная работа конструкции), но также циклический характер действующих на ездовые балки нагрузок обусловлен [82]:

- динамическим характером воздействий при подъёме и опускании грузов;
- локальной передачей воздействий от колёс тележки подвижных: сосредоточенных вертикальных и горизонтальных сил и крутящих моментов.

Эти локальные динамические воздействия вызывают в верхней части балки сложное напряженное состояние, которое перемещается вслед за колесом – в этом основная особенность работы подкрановых конструкций!

Смена циклов локальных напряжений в верхней зоне балки происходит при проходе каждого колеса тележки, поэтому цикличность нагружения зависит как от числа колёс тележки, так и от технологического процесса в цехе. В некоторых случаях тележка совершает незначительные возвратно-поступательные перемещения, находясь на одной и той же балке, поэтому цикличность динамических воздействий колёс во много раз больше, чем цикличность от общего изгиба, происходящего только при полной разгрузке балки.

При поступательном движении тележки возникают изгибные циклы напряжений, на которые накладывается поле подвижных локальных напряжений от колес тележки.

Ветровая нагрузка на краны (перегружатели) создается давлением ветра на наветренную площадь перегружателя, тележки и груза (грейфера) и зависит от наветренной площади, скорости ветра, пульсации этой скорости и формы сечения элементов крана, обтекаемых воздухом.

Скорость ветра изменяется во времени и характеризуется определенным рассеиванием (дисперсией) относительно своего среднего значения. Соответственно этому давление ветра (ветровой напор) можно представить в виде двух составляющих: постоянной составляющей, величина которой практически не изменяется в течение некоторого промежутка времени, и случайной, переменной составляющей, значение которой определяется пульсацией, порывами ветра за это же время.

Порывы ветра, т.е. быстрое изменение скорости ветра во времени, создают определенные динамические нагрузки на элементы конструкции перегружателя. Ветровая нагрузка, действующая на элементы перегружателя при одной и той же скорости ветра, зависит от формы сечения этих элементов, их аэродинамического сопротивления: чем более обтекаемую форму имеет сечение элемента, тем меньше нагрузка. ГОСТ 1451-77 учитывает все основные факторы, определяющие ветровые нагрузки [76].

Разрушение поверхности металла происходит вследствие химического, электрохимического и биохимического воздействий окружающей среды [48, 102]. Коррозионные реакции обусловлены термодинамической неустойчивостью металла, который стремится перейти в ионное состояние. Коррозия в зависимости от агрессивности среды протекает в очень большом диапазоне скоростей, часто носит избирательный характер, иногда достигая величины 1,6 мм в год.

По условиям протекания коррозия, действующая на металлоконструкции мостовых перегружателей является атмосферной [15, 77, 83]. По степени увлажнения поверхности металла атмосферную коррозию можно разделить на три вида: сухая, влажная и электрохимическая.

Процесс сухой атмосферной коррозии протекает при отсутствии влаги на поверхности металла, развивается медленно и приводит обычно лишь к потере декоративных свойств, не вызывая разрушения металлоконструкций.

Одним из основных факторов, определяющих механизм и скорость коррозионного процесса, является влажность воздуха, которая способствует образованию пленки влаги на поверхности элементов. Влажная коррозия протекает при наличии паров воды в атмосфере с относительной влажностью ниже 100%. Сам процесс коррозии металлов протекает под невидимым слоем влаги, образующимся на поверхности в результате капиллярной, адсорбционной или ионной конденсации. При этом скорость коррозии зависит от относительной влажности воздуха и от состояния поверхности металла. По данным [102] наиболее разрушительной в условиях промышленной эксплуатации является влажная атмосферная коррозия.

Коррозия металла при наличии на поверхности видимой пленки влаги, образующейся при непосредственном попадании осадков или в результате конденсации влаги при относительной влажности воздуха выше 100%, под так называемой фазовой пленкой влаги, что в свою очередь приводит к электрохимическому механизму протекания атмосферной коррозии. Скорость коррозии под слоем влаги намного превышает скорость сухой атмосферной коррозии и в большой мере зависит от толщины слоя влаги: при увеличении слоя влаги до 1 мкм скорость коррозии возрастает в десятки раз [5, 15].

Различают два вида электрохимической коррозии: коррозия в электролитах (подвод жидкости к поверхности металла не ограничен) и атмосферная коррозия (электролит присутствует в виде тонкой пленки влаги на поверхности металла). Кроме того, существенно ускоряет процесс коррозии наличие в атмосфере агрессивных газов, а также запыленность воздуха.

Опасной является также щелевая коррозия, протекающая в конструктивных зазорах элементов. Распирающее воздействие продуктов коррозии в щелях часто приводит не только к большим деформациям, но и к отрыву связующих заклепок или сварных швов.

Коррозионные процессы от атмосферных воздействий, зависят и от температуры. Повышение температуры воздуха ускоряет высыхание влаги, что приводит к меньшей продолжительности процессов коррозии. Однако с ростом температуры возрастает скорость химических реакций, в том числе и истинная скорость коррозии. Таким образом, влияние температуры воздуха на коррозию металлоконструкций не однозначно и связано с другими факторами.

Скорость и направление ветра также оказывают влияние на протекание коррозионных процессов: интенсивное движение воздуха около металлических поверхностей способствует ускоренному испарению с них влаги.



Солнечная радиация способствует образованию плотных слоев продуктов коррозии, обладающих большими защитными свойствами и, тем самым, способствует снижению скорости коррозии сталей.

В отличие от коррозионных процессов, протекающих в пористых материалах (бетон, кирпич и т.д.) количество циклов перехода температуры через 0°C, на скорость и интенсивность коррозионных процессов в металле влияния не оказывают.

Как отмечалось выше скорость коррозии в металле, прежде всего, зависит от агрессивности среды. В табл. 1.1 и 1.2 предложены классификации коррозионных сред по отношению к металлу [20].

Повышенная атмосферная коррозионностойкость стали достигается целенаправленным изменением ее химического состава. При одновременном воздействии растягивающих напряжений и агрессивных сред возникает неравномерная коррозия с образованием острых трещин.

Таблица 1.1

Классификация коррозионных сред

<b>Рабочая среда</b>	<b>Неагрессивная</b>	<b>Слабо-агрессивная</b>	<b>Средне-агрессивная</b>	<b>Сильно-агрессивная</b>
$V_{кор}$ , мм/год	не более 0,01	не более 0,05	не более 0,1	менее 0,1

Таблица 1.2

Классификация групп по скоростям коррозионного износа

<b>Группа</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
$V_{кор}$ , мм/год	<0,05	0,05...0,08	0,085...0,014	>0,15

#### **1.4. ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ БАЛОК**

Основные показатели повреждений подкрановых балок, полученные в результате анализа данных обследований, приведены на рис.1.19. Из данного рисунка видно, что до 50% подкрановых балок имели те или иные повреждения.

При этом, как показывают результаты проведенных обследований до 30% всех подкрановых балок имеют те или иные повреждения в течении всего срока эксплуатации (рис.1.20).

Основными причинами возникновения повреждений подкрановых балок являются:

- Динамические воздействия;
- Циклический характер нагружения. При этом имеет место значительный размах напряжений;
- Индивидуальный характер напряженного состояния узлов и элементов подкрановых балок;
- Нарушения на стадии эксплуатации – смещения рельсов, превышающие нормативные значения, сколы, износ головки рельсов, зазоры между головкой рельса и верхним поясом. Данные нарушения приводят к неравномерному нагружению балок и значительным динамическим воздействиям;

- Температурные воздействия;
- Коррозионно-агрессивная среда;
- Дефекты на стадии эксплуатации;
- Остаточные сварочные напряжения;
- Несвоевременное проведение планово-предупредительных ремонтов;
- Не квалифицированно выполненное усиление конструкций, без учета особенностей действительной работы балок

Анализ результатов обследований позволил выявить и систематизировать основные виды повреждений подкрановых балок (рис. 1.21 – 1.28).

Для сварных подкрановых балок наиболее характерными повреждениями являются трещины, которые, как правило, локализируются в верхнем пояском шве и в основном металле стенки в районе зоны сопряжения стенки с верхним поясом, трещины в сварных швах и околошовной зоне крепления ребер жесткости к верхнему поясу и стенки. Большинство трещин развиваются по сварному шву с дальнейшим возможным переходом на стенку.

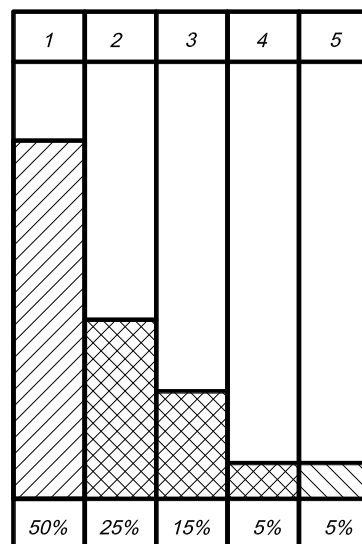


Рис. 1.19. Распределение основных повреждений подкрановых балок:  
 1 – разрушение узлов крепления; 2 – трещины;  
 3 – погибы элементов; 4 – вырезы элементов;  
 5 – отклонение от проектного положения

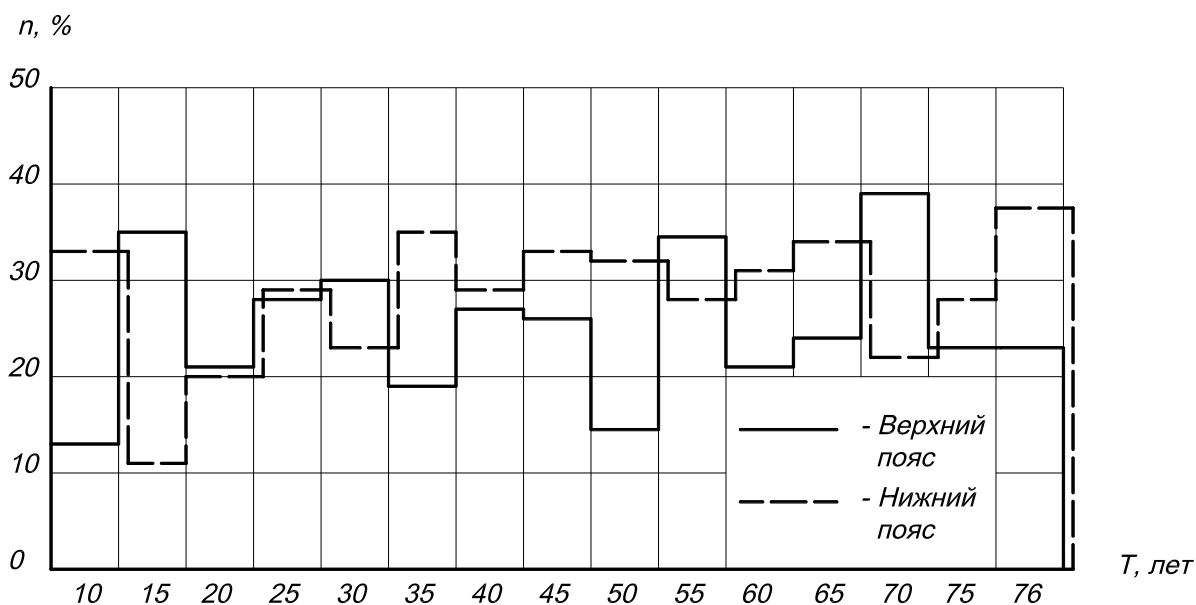


Рис. 1.20. Повреждаемость элементов подкрановых балок



Рис. 1.21. Трещины в уголках верхнего пояса:  
а – продольные; б – поперечные

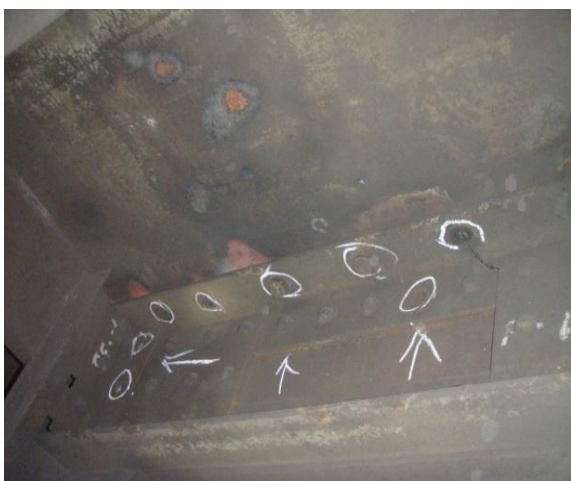


Рис. 1.22. Отсутствие, разрушение и ослабление  
заклепок верхнего пояса



Рис. 1.23. Местные погибы элементов подкрановых балок:  
а – верхних поясов; б – стенок



Рис. 1.24. Трещины в металле шва верхнего пояса с переходом в основной металл стенки подкрановых балок

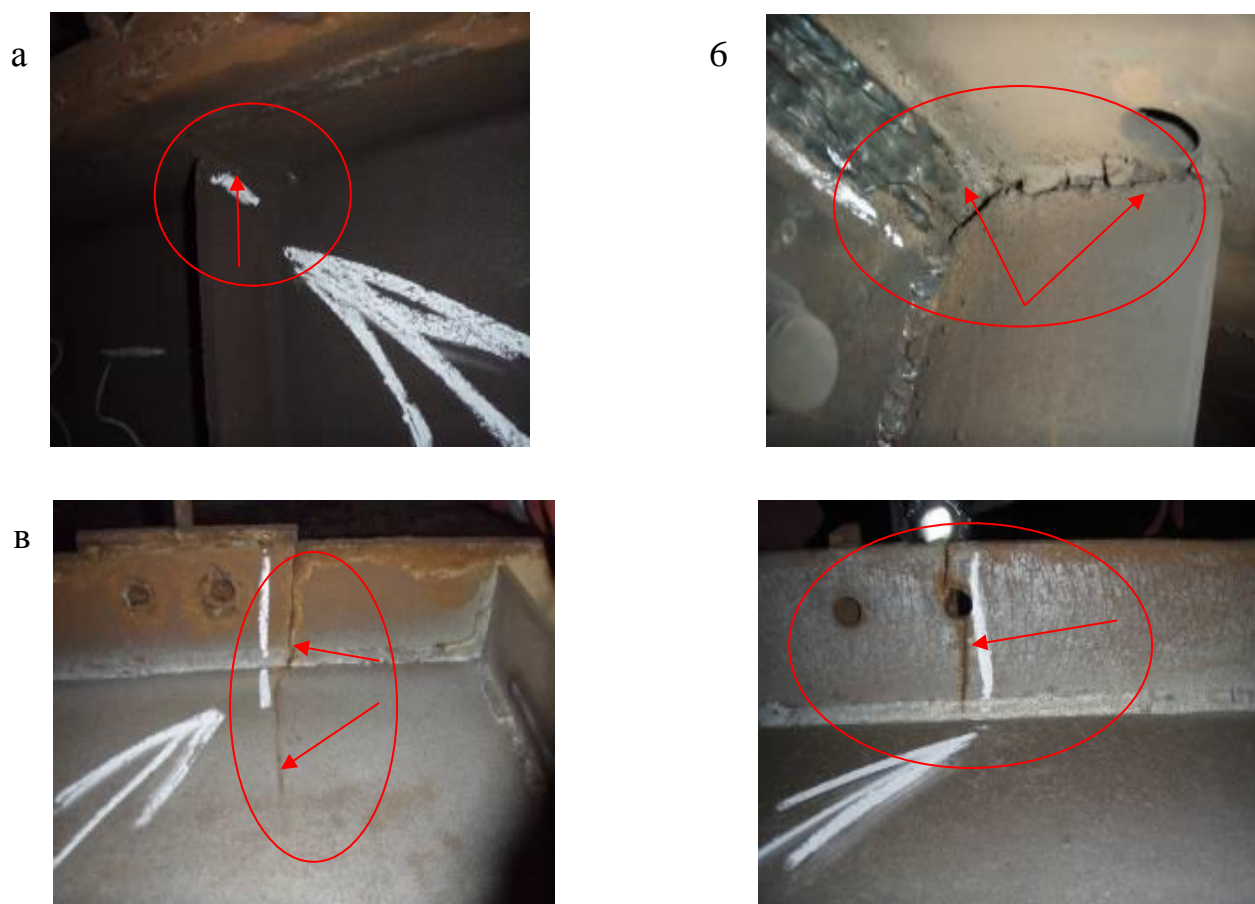


Рис. 1.25. Трещины в элементах подкрановых балок:  
а – в сварном шве узла крепления ребра жесткости;  
б – в металле шва верхнего пояса и ребра жесткости;  
в – в полках верхних поясов в местах установки прижимных планок рельсов

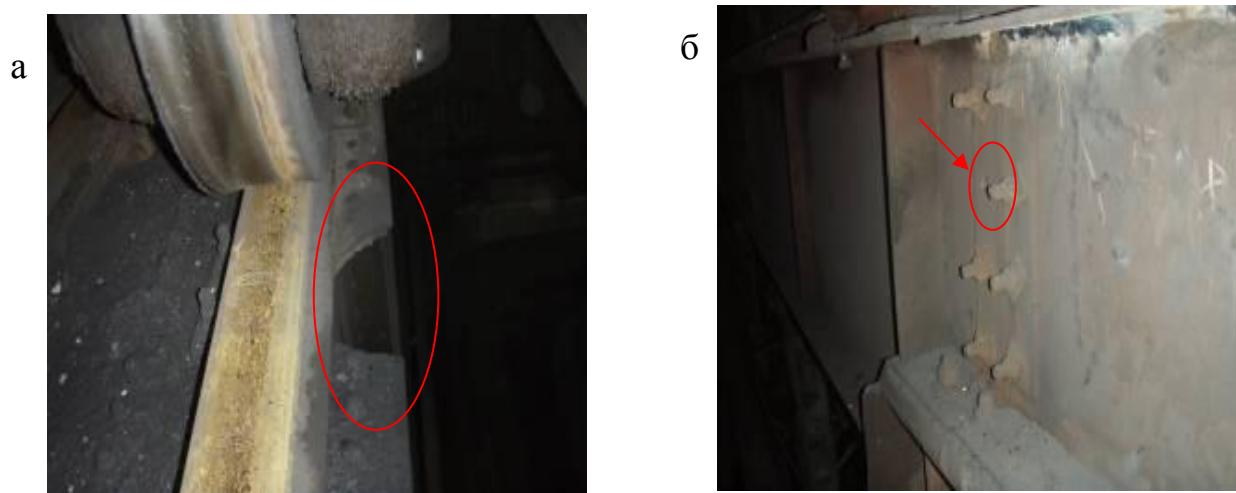


Рис. 1.26. Повреждения элементов подкрановых балок:  
а – вырез в полке верхнего пояса;  
б – отсутствие и ослабление болтов  
крепления подкрановых балок между собой

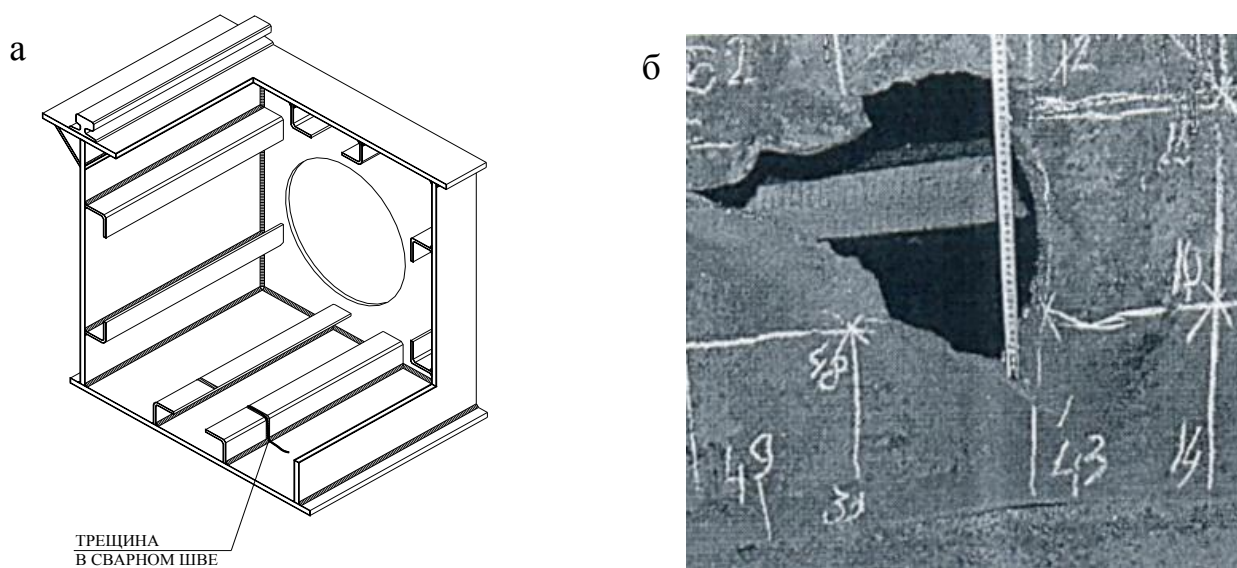


Рис. 1.27. Повреждения элементов ездовых балок коробчатого сечения  
мостовых перегружателей:  
а – трещины в сварных свах ребер жесткости;  
б – разрушение основного металла стенки

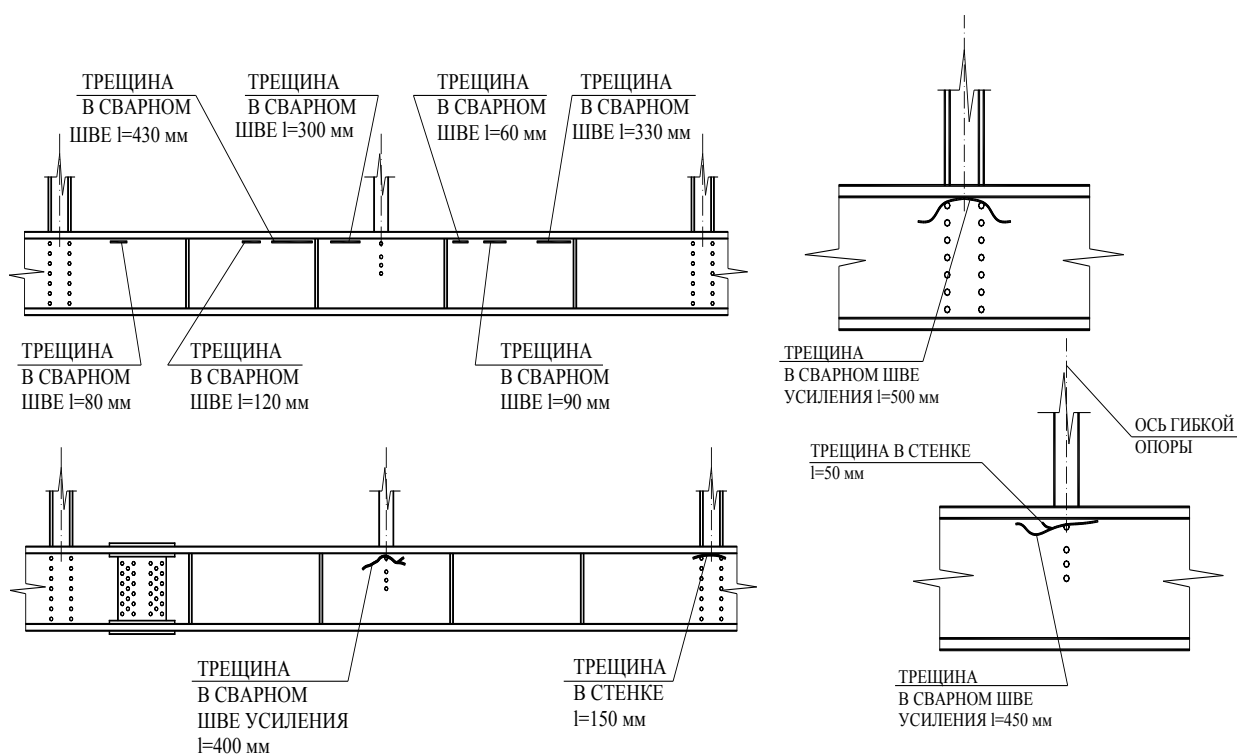


Рис. 1.28. Характерные повреждения ездовых балок мостовых перегружателей с решетчатой системой пролетного строения КХП ОАО «ММК»

Выявленные трещины носят ярко выраженный усталостный характер.

Усталостные трещины имеют значительный диапазон длин – от 50 до 300 мм. Разброс наиболее характерных длин трещин в верхних поясных швах и основном металле стенок подкрановых балок представлен на рис. 1.29, 1.30.

Наиболее часто встречающиеся трещины в сварных швах имели длины от 80 до 100 мм и присутствовали у 8% балок. Трещины длиной от 150 до 250 мм выявлены у 5% балок. Максимальная длина обнаруженных трещин достигала 300 мм. Для трещин, расположенных в основном металле стенок, также наиболее характерные длины колеблются в пределах от 60 до 100 мм и встречаются у 10% балок.

Необходимо отметить наличие поперечных трещин в верхних поясах. Как правило, поперечные трещины возникают у отверстий болтов крепления прижимных планок рельса. Однако, данные трещины встречаются редко и не носят массового характера.

По мере эксплуатации подкрановых конструкций наблюдается значительная динамика роста трещин. Количество трещин у 5% процентов балок выявлено при их работе до 20 лет включительно, при эксплуатации балок от 25 до 50 лет трещины присутствуют в 25% конструкций, при эксплуатации 65 лет и более трещины обнаружены в 40% обследованных балок (рис.1.31).

С учетом срока от начала эксплуатации наиболее часто встречающиеся по длине трещины распределяются следующим образом: по истечении 20 лет наиболее массовыми являются трещины длиной до 40 мм, в течении последующих двадцати лет происходит рост до 80 мм и максимальных длин 100-120 мм трещины достигают к 50 году эксплуатации (рис.1.32).

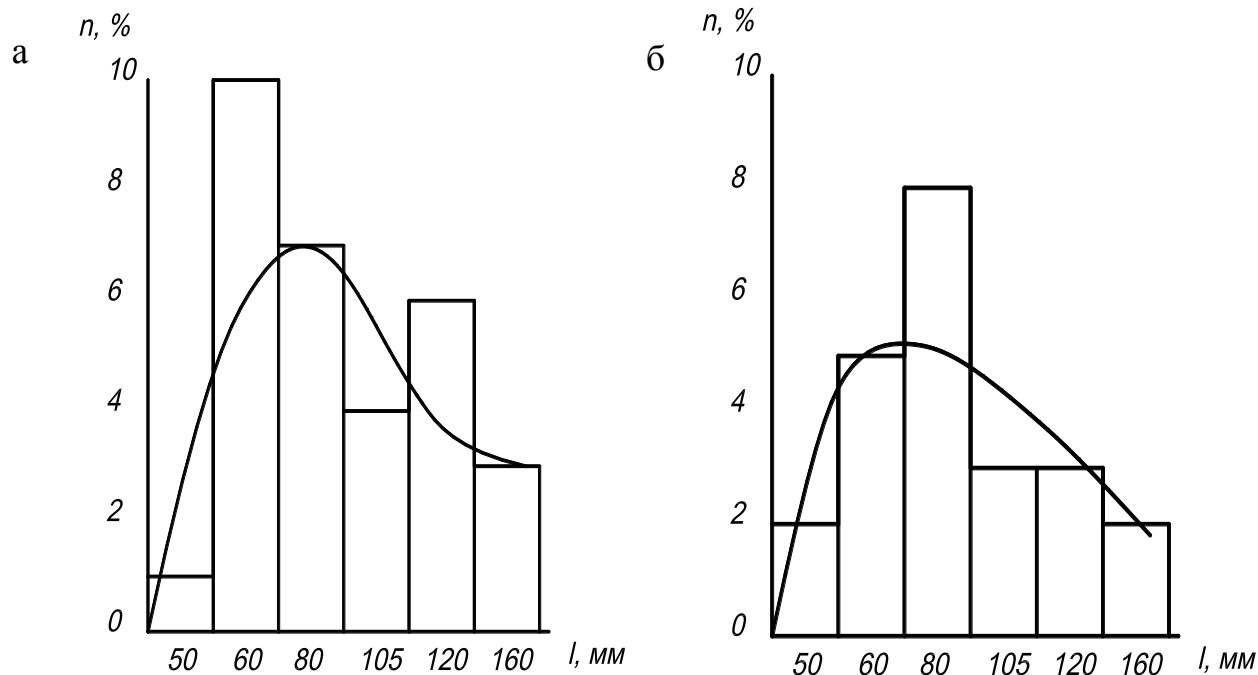


Рис. 1.29. Распределение длин трещин в подкрановых балках предприятий металлургической промышленности:  
а – стенка; б – сварные швы

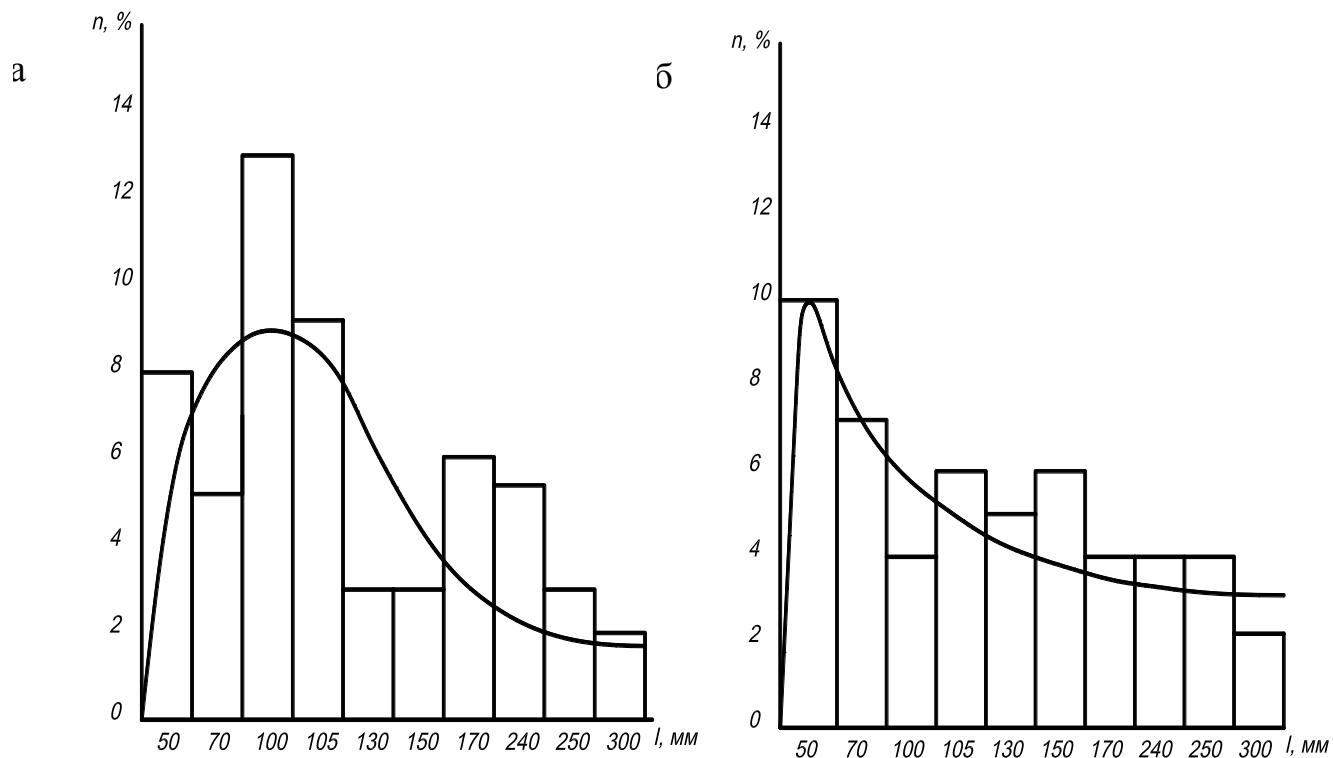


Рис. 1.30. Распределение длин трещин в подкрановых балках предприятий горно-рудной промышленности:  
а – стенка; б – сварные швы

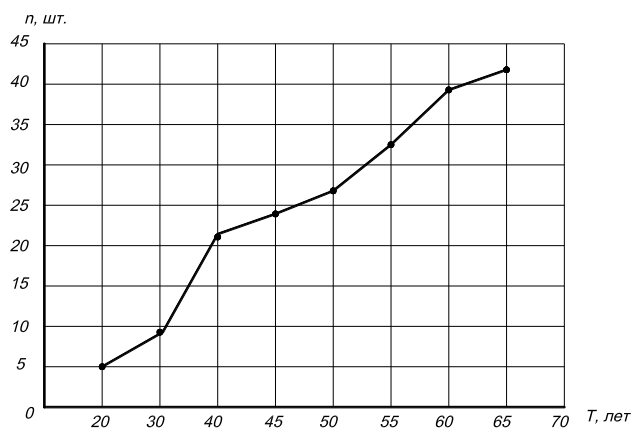


Рис. 1.31. Динамика увеличения количества усталостных трещин подкрановых балок

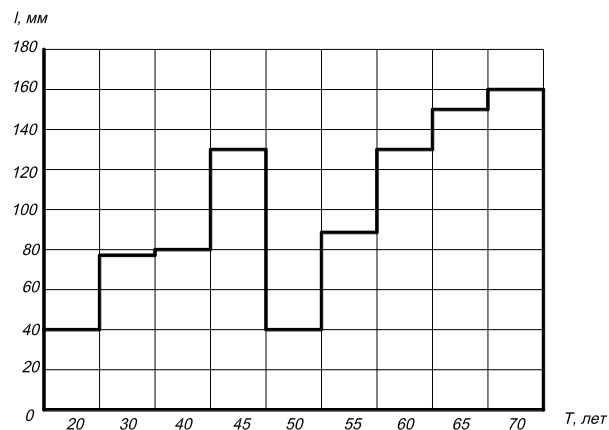


Рис. 1.32. Частота наиболее характерных длин усталостных трещин

Далее наблюдается положительная динамика к уменьшению количества трещин с их последующим ростом в течении последующих двадцати пяти лет до 180 – 200 мм. Резкое изменение частоты характерных длин трещин связано с проведением капитальных ремонтов, реконструкций с частичной заменой подкрановых балок.

Местные погибы встречаются, как правило, у всех элементов подкрановых балок. Наиболее подвержены данному повреждению верхние и нижние пояса: около 5% балок имели местные погибы со стрелой подъема от 30 до 50 мм, у 10% балок выявлены погибы, достигающие 20 мм. До 10% стенок балок имели погибы от 20 до 30 мм, для ребер жесткости наиболее часто встречающиеся погибы выявлены в пределах от 35 до 50 мм.

Частоты местных погибов элементов подкрановых балок представлены на рис.1.33-1.36.

На рис. 1.37-1.40 представлены наиболее часто встречающиеся вырезы в поясах, стенках и ребрах жесткости подкрановых балок. У 5% обследованных балок наиболее часто встречаются вырезы площадью от 1500 до 2500 мм<sup>2</sup>. Максимальные вырезы по площади достигают 3000-3500 мм<sup>2</sup>.

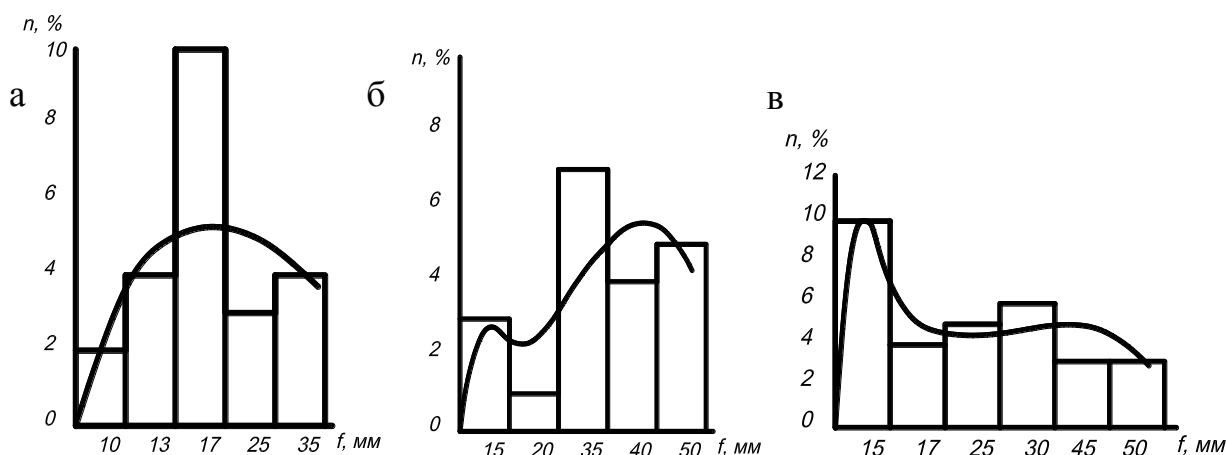


Рис. 1.33. Местные погибы верхних поясов подкрановых балок: а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность; в – теплоэнергетическая промышленность



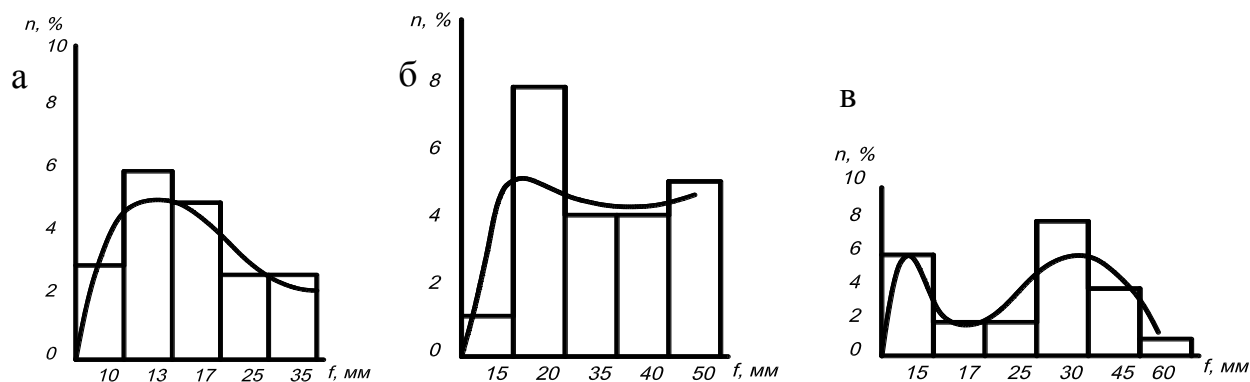


Рис. 1.34. Местные погибы нижних поясов подкрановых балок:  
а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность;  
в – теплоэнергетическая промышленность

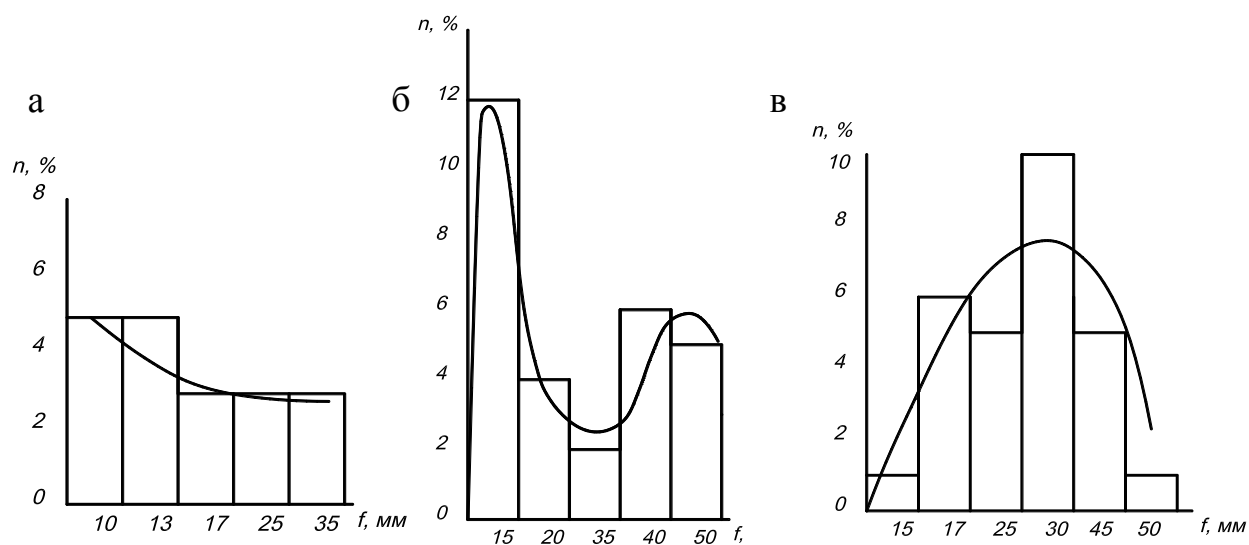


Рис. 1.35. Местные погибы стенок подкрановых балок:  
а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность;  
в – теплоэнергетическая промышленность

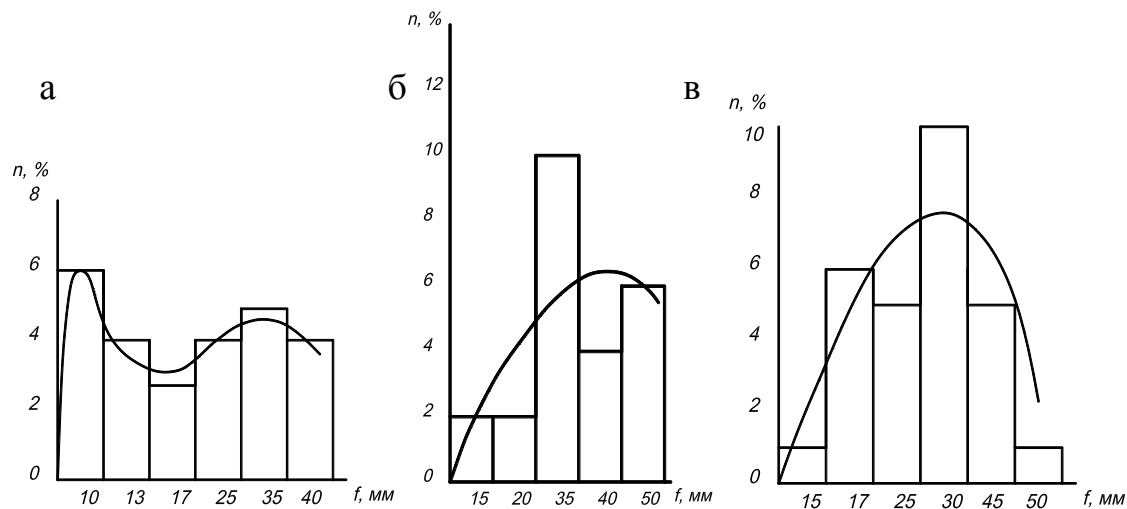


Рис. 1.36. Местные погибы стенок подкрановых балок:  
а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность;  
в – теплоэнергетическая промышленность

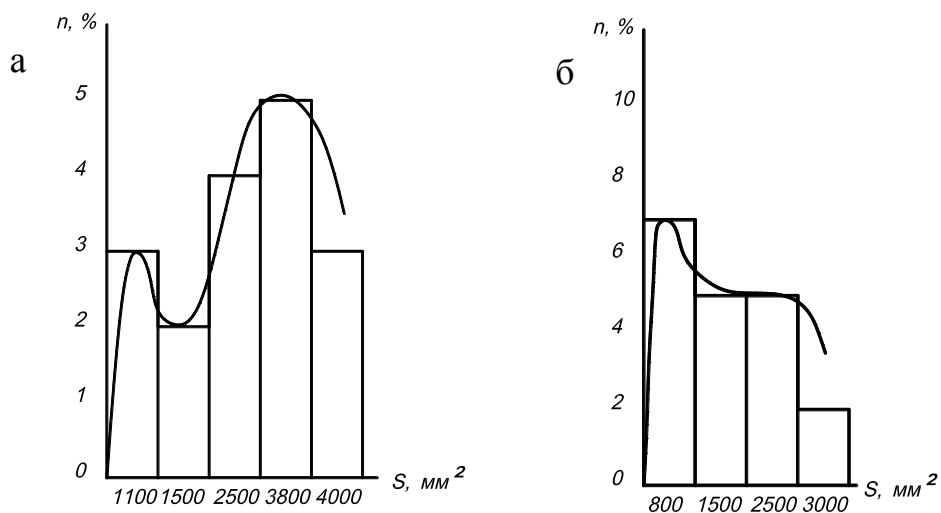


Рис. 1.37. Вырезы в металле верхних поясов подкрановых балок: а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность

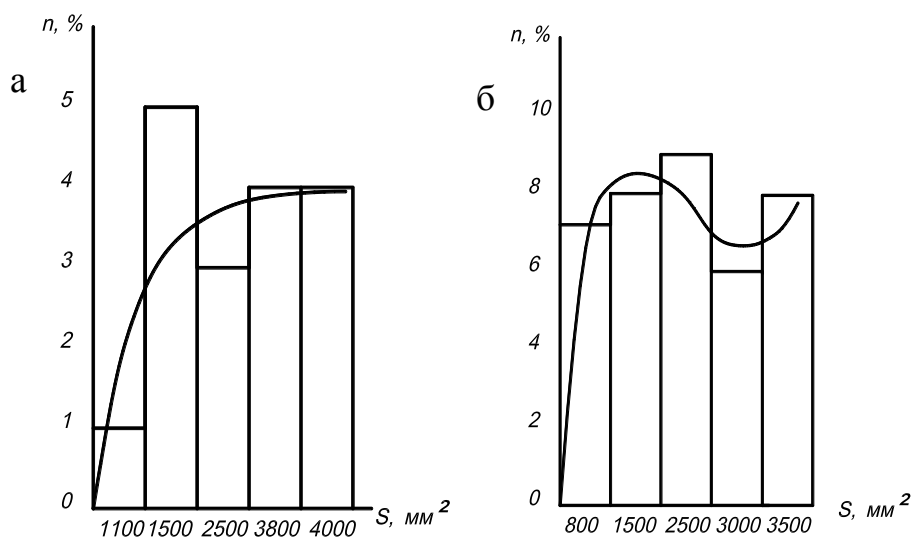


Рис. 1.38. Вырезы в металле нижних поясов подкрановых балок: а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность

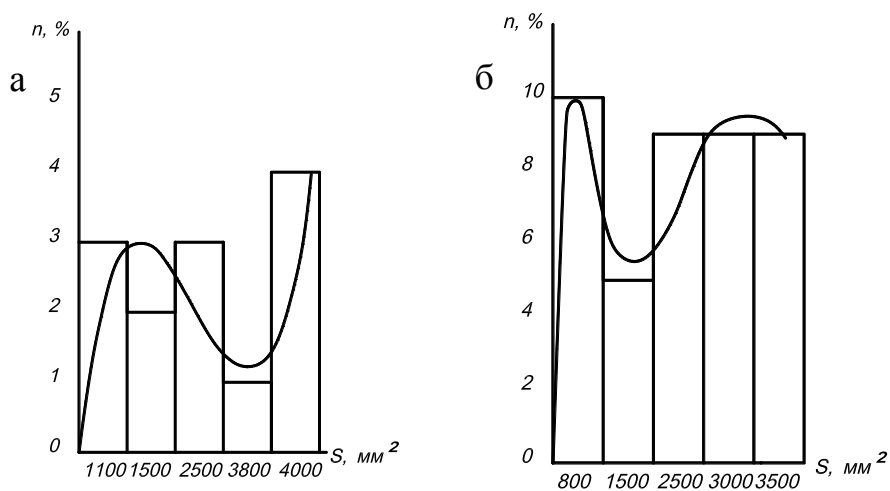


Рис. 1.39. Вырезы в металле стенок подкрановых балок: а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность

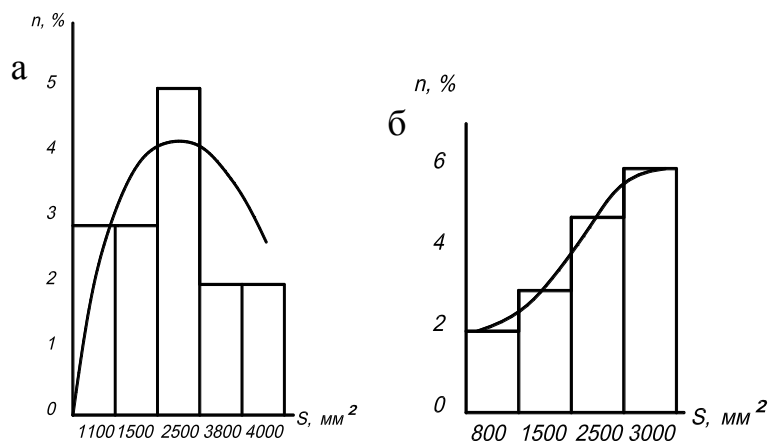


Рис. 1.40. Вырезы в металле стенок подкрановых балок:  
 а – металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность

Наиболее массовый характер носит разрушение узлов крепления подкрановых балок к колоннам и подкрановых балок между собой (рис. 1.41, 1.42).

В количественном выражении наиболее повреждаемые узлы крепления подкрановых балок между собой выявлены при обследовании каркасов цехов, относящихся к металлургии: до 25% балок имеют количество ослабленных болтов в пределах 20 шт., 50% балок – до 15 шт. и 75% – до 10 шт. Узлы подкрановых балок объектов горно-рудной промышленности и теплоэнергетики имеют значительно меньшее количество ослабленных болтов (25% балок – 4-6 шт.; 50% – до 4-х шт.), что объясняется особенностями конструктивных решений и более легким режимом работы мостовых кранов.

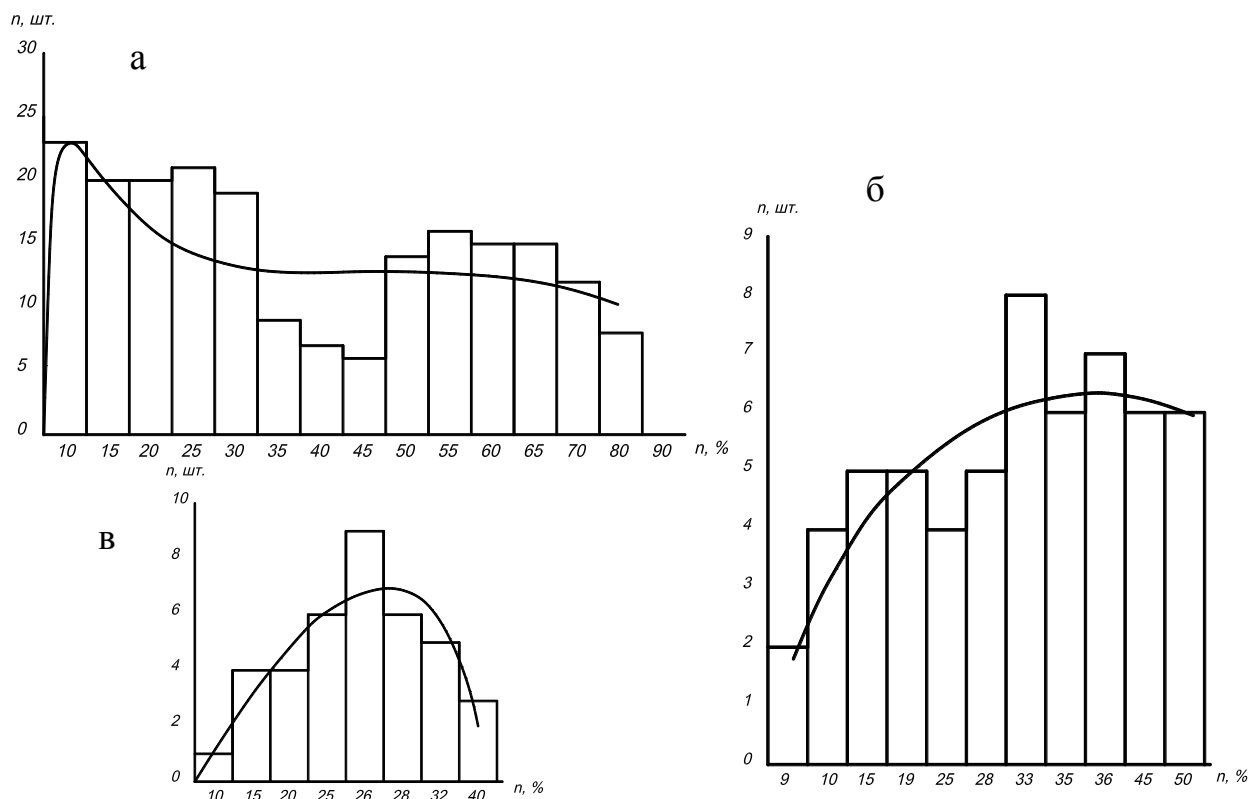


Рис. 1.41. Разрушение узлов крепления подкрановых балок между собой:  
 а – Металлургическая промышленность; б – горно-рудная промышленность;  
 в – теплоэнергетическая промышленность

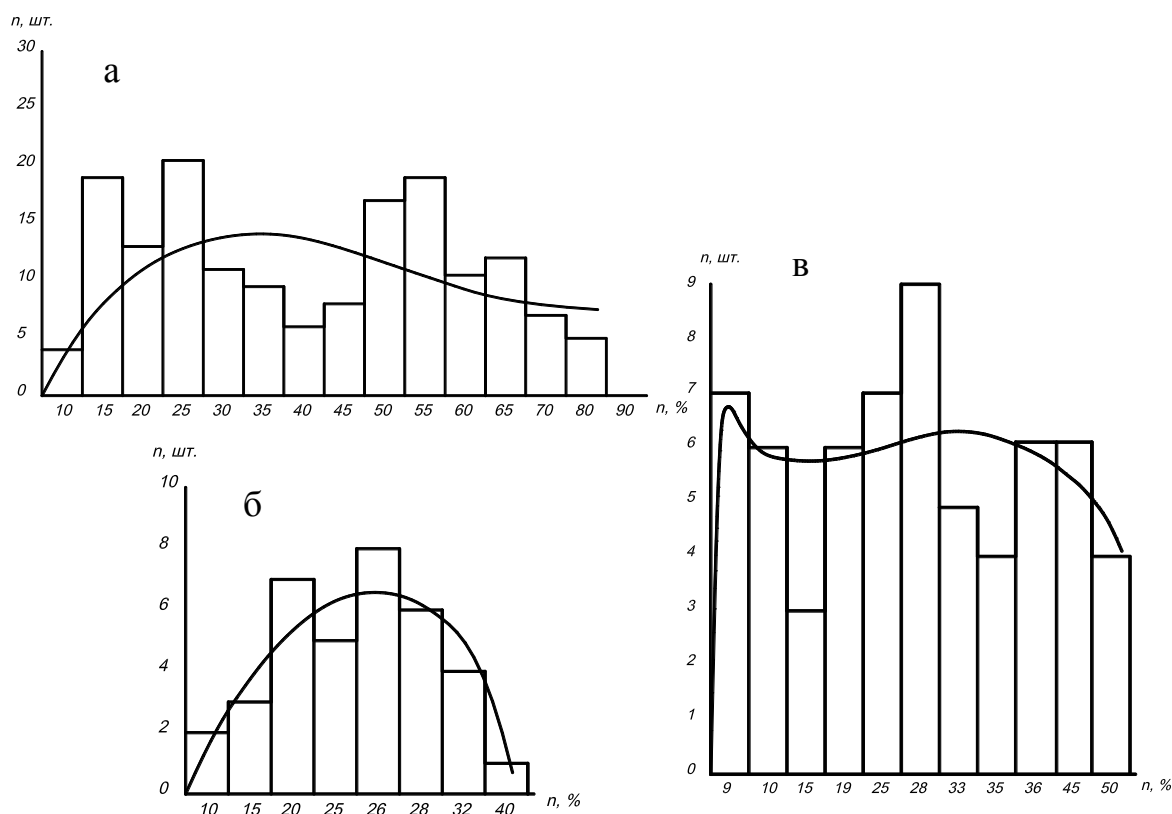


Рис. 1.42. Разрушение узлов крепления подкрановых балок к колоннам:  
 а – металлургическая промышленность;  
 б – теплоэнергетическая промышленность;  
 в – горно-рудная промышленность

На повреждаемость элементов и узлов подкрановых балок значительным образом влияет интенсивность нагружения, вследствие работы грузоподъемного оборудования. На рис.1.43, 1.44 представлены диаграммы распределения трещин по длине пролетов в зонах сопряжения верхнего пояса и ребер жесткости со стенкой. На основании данных, полученных в результате обследований можно выявить зоны с наиболее интенсивной работой кранов, т.е. зоны, где суммарная длина трещин и их число образуют резкие пики. Количество трещин, а соответственно и пики, значительно уменьшаются в торцах зданий, зонах обслуживания кранов, а также по длине пролетов на участках с отсутствием основного технологического оборудования. Аналогичная ситуация наблюдается практически во всех обследованных пролетах.

В целом, анализ результатов проведенных обследований показал, что срок эксплуатации подкрановых балок можно разбить на условно-постоянные временные периоды: при эксплуатации до 25 лет средняя повреждаемость балок достигает 30%, следствием чего является выполнение ремонтно-восстановительных работ. Периодичность проведения ремонтных работ на кранах-перегрузателях КХП ОАО «ММК» представлены на рис. 1.45 и 1.46.

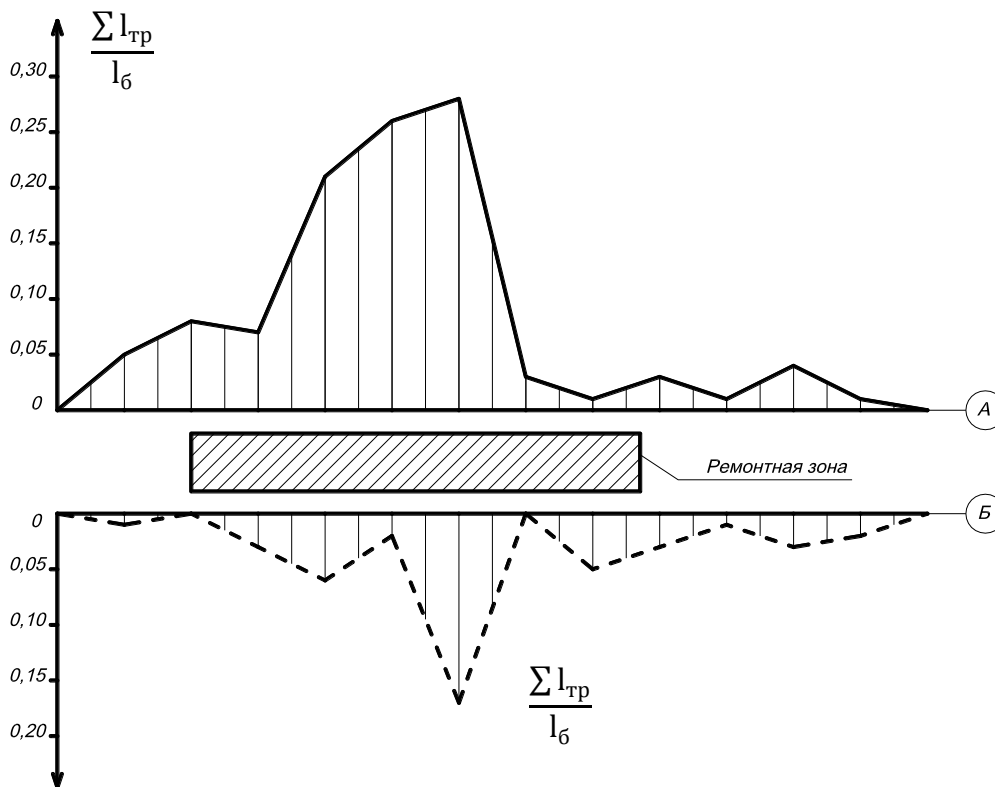


Рис. 1.43. Распределение длин трещин по длине пролета вагонного депо железнодорожного цеха металлургического завода:  
 $\sum l_{тр}$  – суммарная длина трещин на балке;  $l_b$  – пролет балки

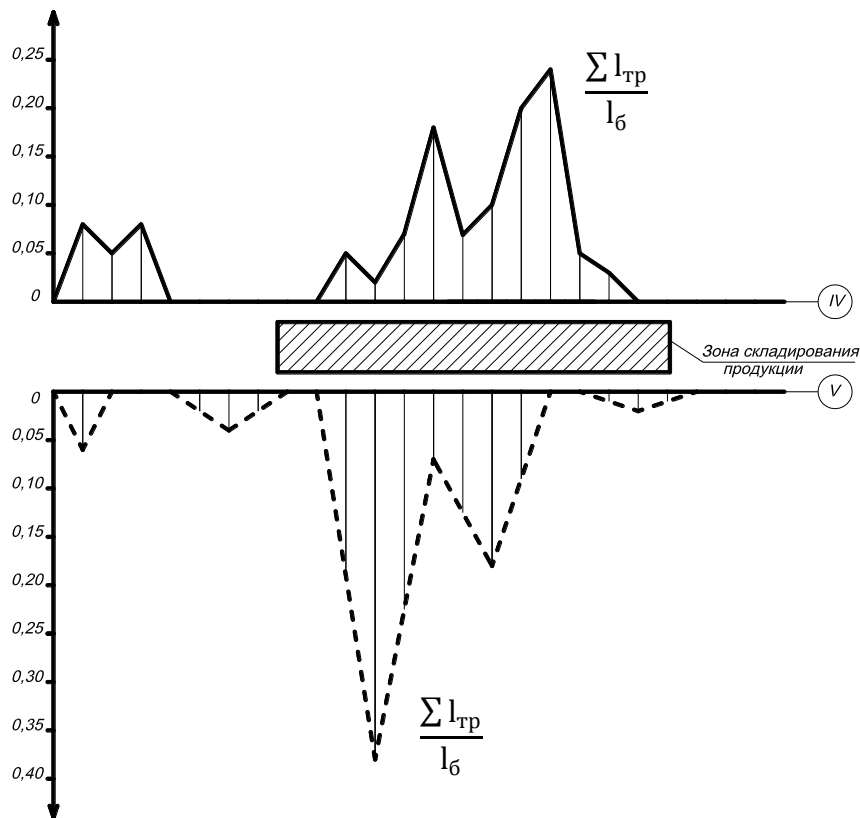


Рис. 1.44. Распределение длин трещин по длине пролета цеха готовой продукции металлургического завода:  
 $\sum l_{тр}$  – суммарная длина трещин на балке;  $l_b$  – пролет балки



Рис.1.45. Периодичность проведения ремонтных работ на мостовых перегружателях с ездовыми балками двутаврового сечения КХП ОАО «ММК»



Рис. 1.46. Периодичность проведения ремонтных работ на мостовых перегружателях с ездовыми балками коробчатого сечения КХП ОАО «ММК»

Выполнение ремонтно-восстановительных работ, как правило, приводящих к снижению количества поврежденных конструкций в два раза (рис.1.47). Далее через 10-летние промежутки происходит циклическое накопление повреждений с последующим их устранением.

Максимальное количество накопленных повреждений наблюдается при сроке эксплуатации 45-50 лет. Количество поврежденных балок в данном случае составляет, примерно, 80% от их числа. При этом накопление повреждений происходит по линейному закону (рис.1.48).

Указанный временной промежуток является граничной точкой для проведения капитального ремонта конструкций с их частичной заменой – по результатам обследований в послеремонтный период количество поврежденных балок снижается до 30-35%. По мере дальнейшей эксплуатации тенденция периодов «накопление повреждений – ремонт» продолжает сохраняться, при этом максимальное количество поврежденных балок не превышает 60%.

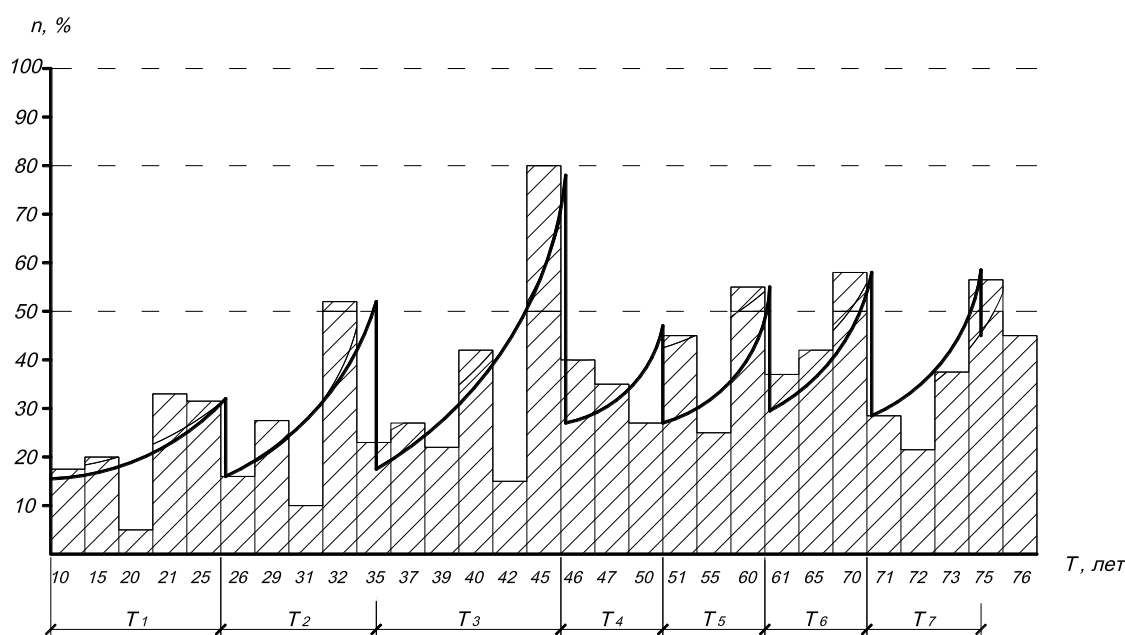


Рис. 1.47. Повреждаемость подкрановых балок

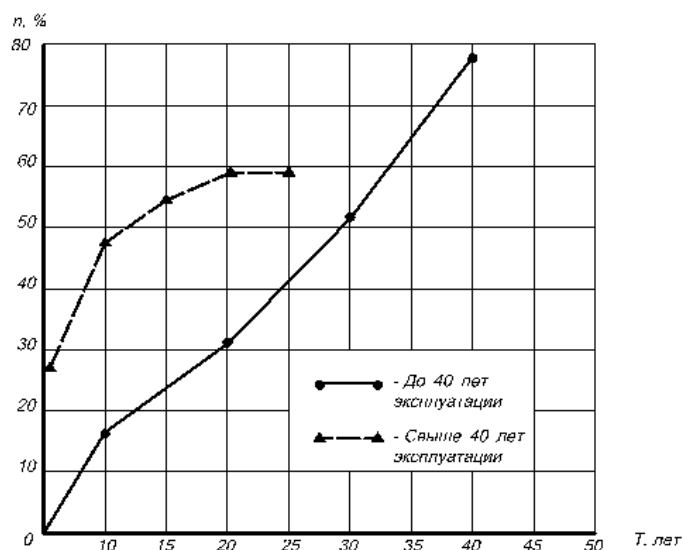


Рис. 1.48. Динамика повреждаемости балок, в зависимости от срока эксплуатации

## Глава 2

# АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ЦИКЛИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

### 2.1. ЕЗДОВЫЕ БАЛКИ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

Для изучения кинетики напряженно-деформированного состояния ездовых балок мостовых перегружателей в производственных условиях в настоящей работе был применен тензорезистивный метод [196]. Измерения выполнялись проволочными тензорезисторами с базой 5-10 мм, которые объединялись в трехкомпонентные прямоугольные тензорозетки.

Используемый метод обладает следующими преимуществами:

1. Высокой чувствительностью при измерении деформаций;
2. Минимально возможной базой измерения, позволяющие получать наименьшие погрешности;
3. Дистанционности регистрации и возможности опроса большого числа тензорезисторов, что позволяет применять метод при испытании натуральных конструкций.

Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась при помощи информационно-измерительной системы СИИТ-3 в автоматическом режиме опроса и выдачи информации, а также при помощи автоматического измерителя деформаций АИД-4М.

Установка тензорезисторов на кранах №1, 2, 3 КХП ОАО «ММК» показана на примере мостового перегружателя №2.

Схемы размещения тензорезисторов в исследуемых узлах и сечениях ездовых балок показаны на рис.2.1-2.5.

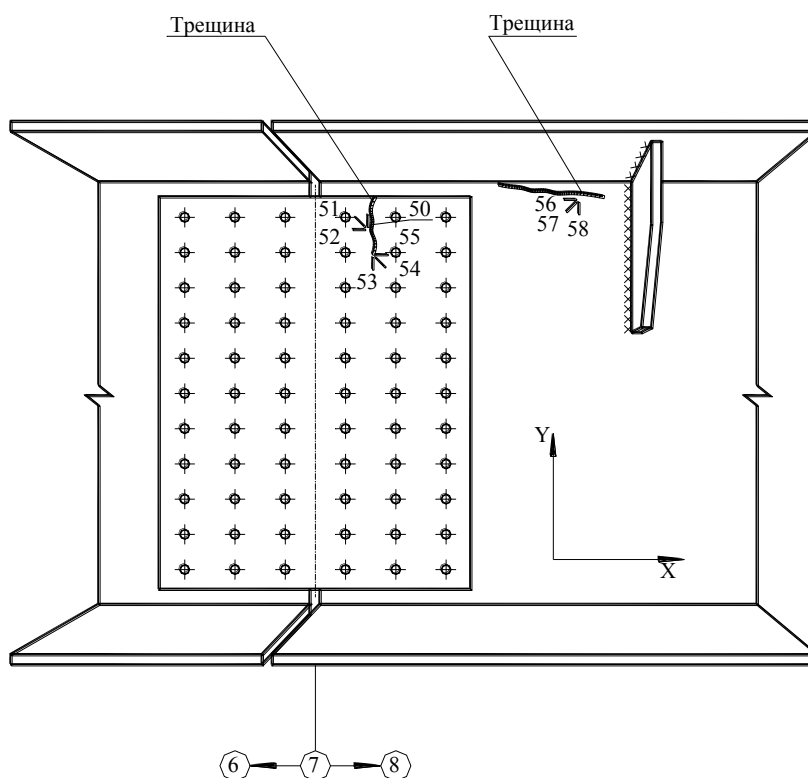


Рис. 2.1. Размещение тензорозеток в местах расположения трещин по стенке ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ММК



Для исследования деформаций северной главной фермы мостового перегружателя активные тензорезисторы размещались на элементах верхнего пояса, нижнего пояса и раскосах.

На рис.2.1 приведены фрагменты ездовой балки северной стороны исследуемого мостового перегружателя, где схематично показаны конструктивные элементы балки без заводских швов и невидимых линий, детали усиления и монтажные швы.

В сечении 1 – 1 у оси «5» ездовой балки размещались группы тензорезисторов, объединенные в тензорозетки (рис.2.2). Подобные тензорозетки использовались для изучения напряженно-деформированного состояния стенки ездовой балки, имеющей трещины, а также у коротких поперечных ребер усиления (рис.2.3).

Для изучения работы узлов крепления ездовой балки к узлам главной фермы по оси «б» (в средней части консоли жесткой опоры) и по оси «10» (в средней части пролета) смонтированы прямоугольные тензорозетки, которые размещались сверху на соединительных уголках вертикальных диафрагм (рис.2.3-2.5).

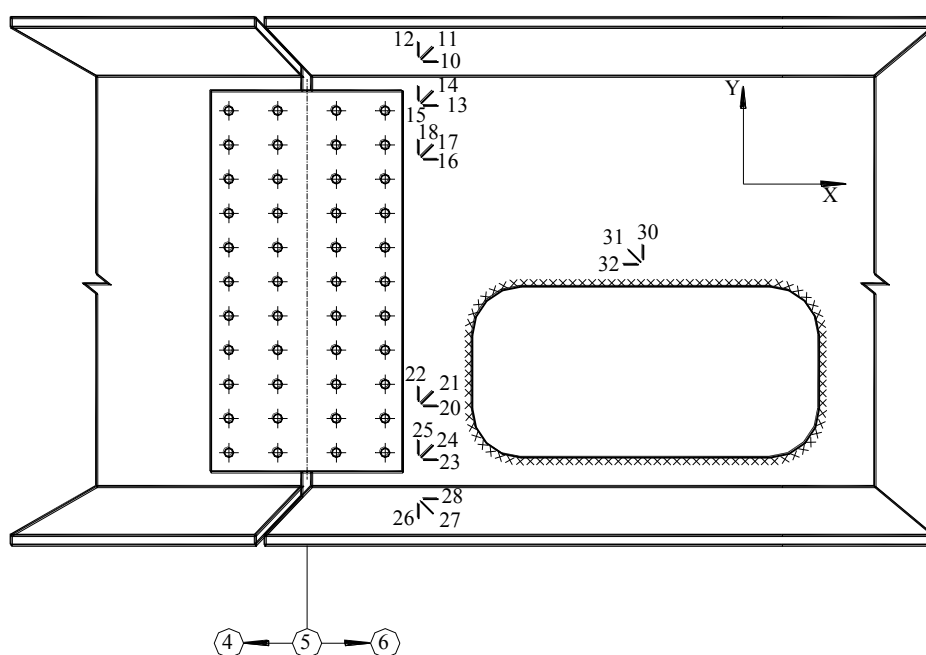


Рис. 2.2. Размещение тензорозеток по сечению ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК»

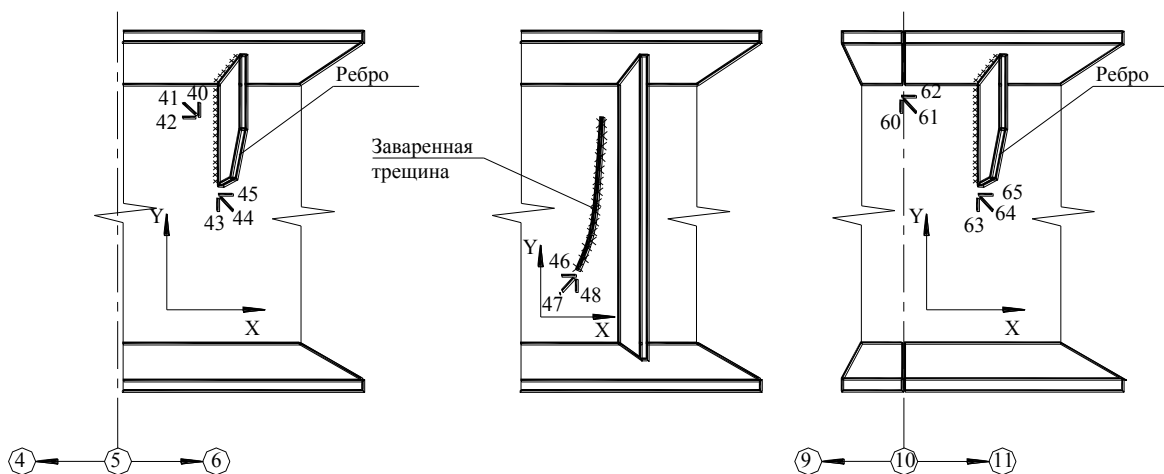


Рис. 2.3. Размещение тензорозеток в местах усиления стенки ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК»

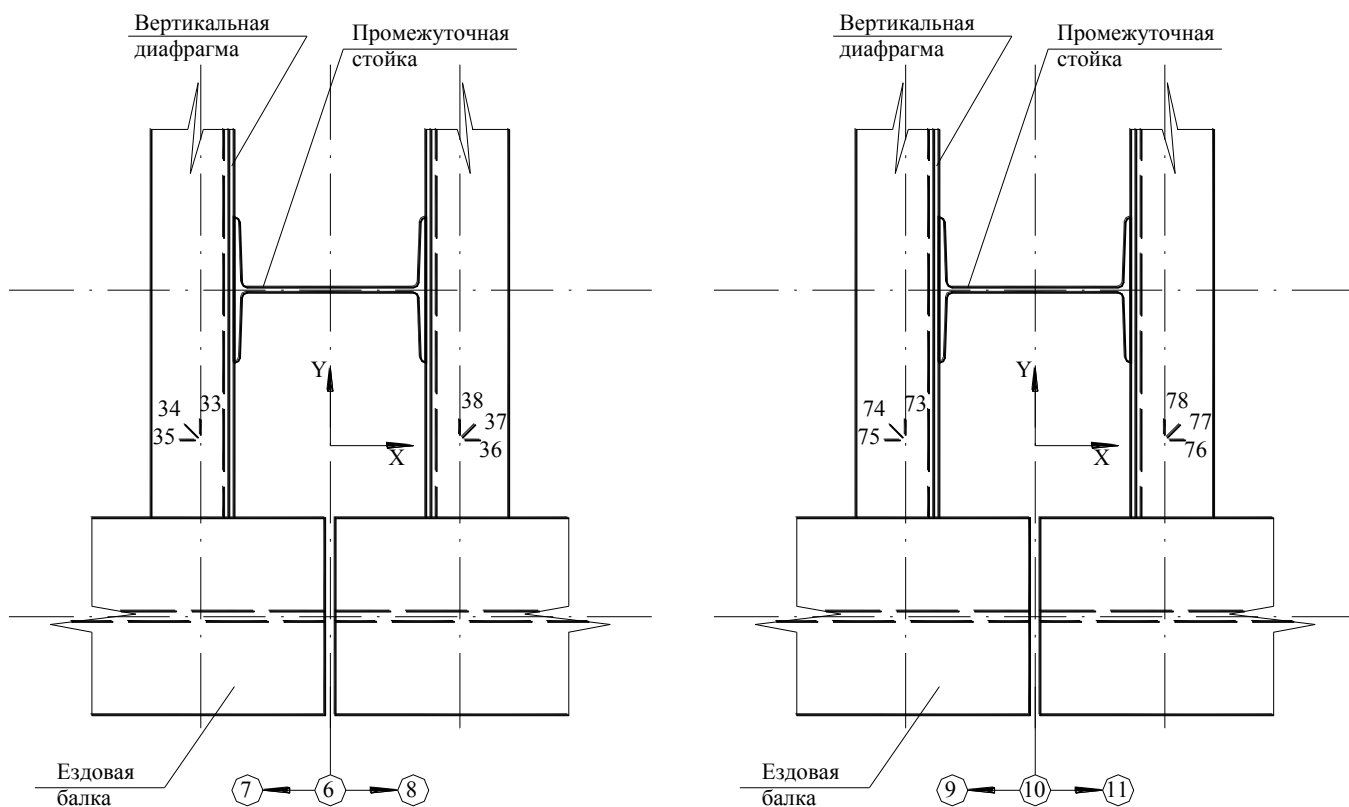


Рис. 2.4. Размещение тензорозеток на уголках узла крепления ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК»

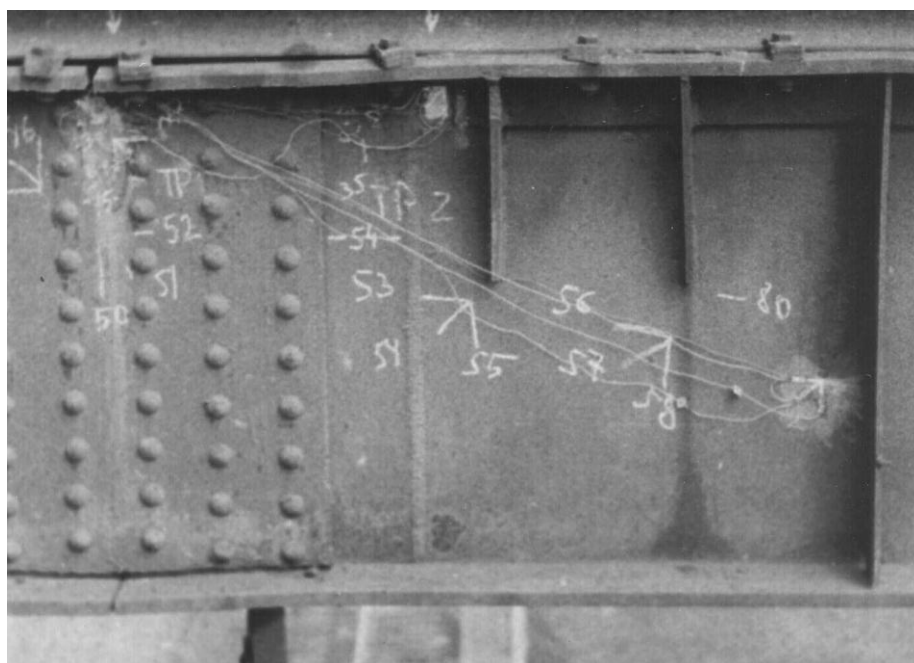


Рис. 2.5. Фрагмент ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК» с тензорозетками, расположенными у ребра усиления

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций мостового перегружателя были использованы проволочные тензорезисторы с базой 10 мм. Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась при помощи информационно-измерительной системы СИИТ-3.

Испытания конструкций мостового перегружателя производились при установке тележки с грузом в положениях I-V (рис.1.10).

В первом (начальном) положении тележка с грузом находилась в самом крайнем положении на консоли со стороны гибкой опоры. Далее тележка с грузом находилась в самом крайнем положении на консоли со стороны жесткой опоры. Далее тележка с грузом устанавливалась во втором положении над жесткой опорой так, чтобы центр грейфера совпадал с осью опоры. Затем тележка с грузом перемещалась на середину пролета в третье положение.

«Нулевые» отсчеты тензорезисторов получали при установке тележки крана над гибкой опорой (четвертое положение), окончательно тележка с грузом возвращалась в первое (конечное) положение (рис. 1.10). После установки тележки с максимальным грузом в характерном положении давалась выдержка во времени до 15 мин.

Установка тензорезисторов на ездовых балках кранов №4, 5, 6 КХП ОАО «ММК» показана на примере мостового перегружателя №4.

Тензометрические испытания проводились на восточной балке крана-перегружателя №4 в отсеках №29 и №16, расположенных соответственно в пролетной части моста (рис.2.6) и в консольной части у жесткой поры (рис.2.7).

Прямоугольные тензорозетки в процессе 1-го этапа испытаний (в пролетной части) размещались по внутреннему периметру сечения балки в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.6. Тензорозетки №4, №6, №13 и №20 располагались посередине между ребрами жесткости (рис.2.7).

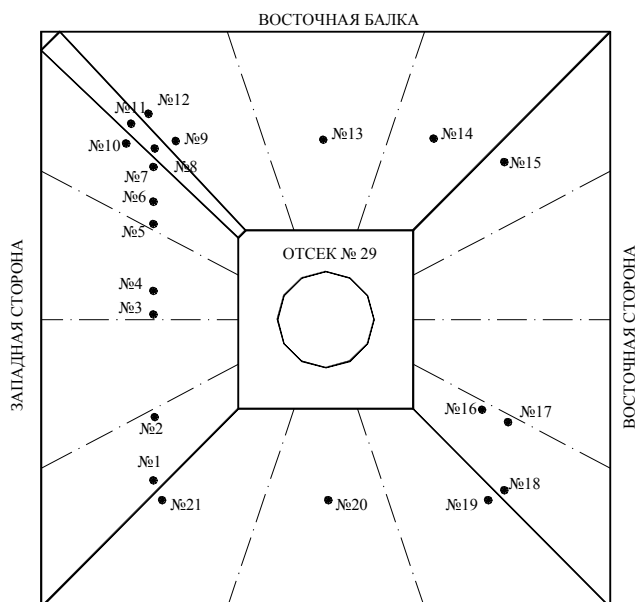


Рис. 2.6. Размещение тензорозеток в пролетной части ездовой балки мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК»

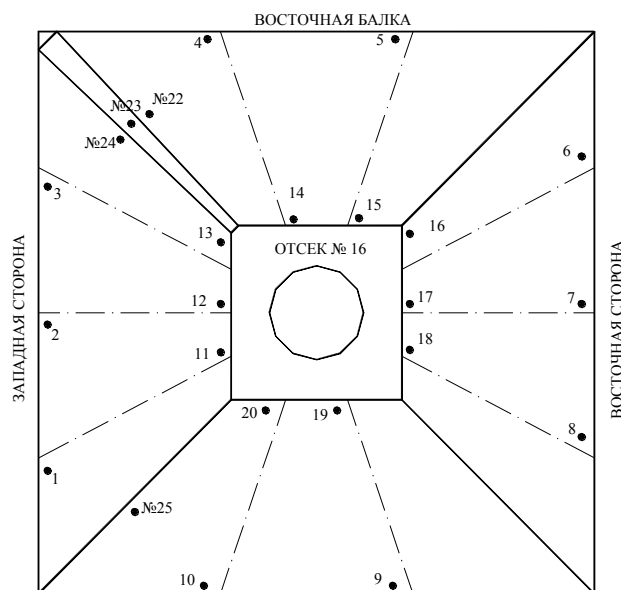


Рис. 2.7. Размещение тензорозеток в консольной части ездовой балки мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК»

Тензорозетки №8 и №11 располагались в средней части наклонной ламели шириной 140 мм.

Привязка центров остальных тензорозеток составляла 40 мм от продольных сварных швов. Прямоугольные тензорозетки и отдельные тензорезисторы в процессе второго этапа испытаний (в консольной части) размещались в соответствии со схемой, приведенной на рис.2.7.

Тензорозетки с №22 по №24 располагались в зоне зарождения трещин. Привязка центров тензорозеток аналогична соответствующим участкам 1 этапа испытаний (в пролетной части).

В процессе тензометрических испытаний регистрация показаний тензорезисторов производилась тензометрической аппаратурой СИИТ-3. Опрос тензорезисторов производился в автоматическом режиме по 3 раза при каждом из пяти положений тележки с грузом (см. рис. 1.12). Выдерживание нагрузки в каждом положении – 15 мин.

Для изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций мостового перегружателя Петропавловской ТЭЦ-2 и Орско-Халиловского металлургического комбината были использованы проволочные тензорезисторы с базой 5 мм. В исследуемых сечениях ездовых балок (рис. 1.16, 1.17) и на диафрагмах, крепящих ездовые балки к нижним поясам главных ферм, использовались прямоугольные тензорозетки.

Регистрацию показаний тензорезисторов осуществляли при помощи информационно-измерительной системы СИИТ-3. Испытания конструкций мостового перегружателя проводились при установке тележки в положениях I-IV.

Начальные отсчеты тензорезисторов снимали при установке нагруженной тележки крана в положение «О». После этого тележку крана загружали углем и последовательно перемещали в направлении от консоли со стороны жесткой опоры к консоли у гибкой опоры (прямой ход) и в обратном направлении (обратный ход).

При каждом положении тележки мостового перегружателя производили трехкратный опрос тензорезисторов. При этом регистрацию показаний тензорезисторов осуществляли после фиксации положения тележки в заданном положении и выдерживания нагрузки в течении 15-20 мин.

**Методика обработки результатов изучения кинетики НДС ездовых балок мостовых перегружателей.** Обработка результатов экспериментальных исследований произведена по разработанной в МГТУ программе «TENS» на персональных ЭВМ. При обработке показаний трехкомпонентных прямоугольных тензорозеток ( $\varphi_1 = 0^\circ$ ,  $\varphi_2 = 45^\circ$ ,  $\varphi_3 = 90^\circ$ ) по измеренным компонентам  $E_0$ ,  $E_{45}$ ,  $E_{90}$  главные деформации вычисляли согласно [196] по формуле:

$$\varepsilon_{1,2} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}) / 2 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \quad (2.1)$$

Угол поворота осей главных деформаций вычисляли по формуле:

$$\varphi = 0,5 \arctg \left\{ \frac{[2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})]}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})} \right\} \quad (2.2)$$

Зависимость между напряжениями и деформациями в плоской задаче согласно закону Гука имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= [E/(1 - \mu^2)](\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ \sigma_2 &= [E/(1 - \mu^2)](\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где  $E$  - модуль упругости,  
 $\mu$  - коэффициент Пуассона.

При известных  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\varphi &= \sigma_1 \cdot \cos^2 \varphi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \varphi \\ \tau_\varphi &= (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin^2 \varphi / 2 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

При  $\varphi = 45^\circ$  и  $\varphi = 135^\circ$

$$\tau_{max} = -\tau_{min} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2 \quad (2.5)$$

Известно, что интенсивность напряжений есть функция интенсивности деформаций, характерная для данного материала и не зависящая от вида напряженного состояния

$$\sigma_i = \phi(\varepsilon_i), \quad (2.6)$$

где

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.8)$$

Напряжения и деформации в упругой области связаны между собой обобщенным законом Гука:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 - \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_3 - \sigma_1)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 - \sigma_2)] \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Решив совместно уравнения (2.7) и (2.9) при  $\sigma_3=0$  для плоского напряжённого состояния, получим

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \left[ \varepsilon_2 + \frac{\mu}{1-\mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right]^2 \left[ \frac{\mu}{1-\mu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \varepsilon_1 \right]^2} \quad (2.10)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (2.11)$$

**Определение погрешности измерения деформированного состояния тензорезистивным методом.** В соответствии с ГОСТ 16265-70 под погрешностью понимают разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины

$$\Delta_\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}} - \varepsilon_{\text{ист}} \quad (2.12)$$

На величину погрешности влияют такие факторы, как уровень измеряемой деформации, тип измерительного устройства и условия проведения эксперимента.

Выбранный в настоящих исследованиях тензорезистивный метод измерения деформаций позволяет исключить погрешности, возможные из-за колебаний напряжений в сети питания прибора (реализацией в тензоаппаратуре нулевого метода измерений) и температурный фактор (применением схемной термокомпенсации). Конструкция тензорезисторов, используемых в данной работе, а также непродолжительность проведения эксперимента уменьшают до незначительной величины влияние собственной ползучести тензорезисторов. Поэтому суммарная предельная погрешность измерения деформаций  $\Delta_\varepsilon$  складывается из двух главных компонентов: погрешности, связанной с разбросом коэффициентов тензочувствительности  $S$  используемых тензорезисторов и погрешности снятия отсчетов  $\varphi$  и  $\varphi_0$  с прибора.

Формула оценки погрешности деформаций с учетом закона сложения частных погрешностей косвенного измерения будет иметь вид [209]:

$$\Delta_\varepsilon = \sqrt{D_S^2 + D_\varphi^2 + D_{\varphi_0}^2}, \quad (2.13)$$

либо в виде относительной величины

$$\Delta_\varepsilon = \frac{\Delta_\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{D_S^2 + D_\varphi^2 + D_{\varphi_0}^2}, \quad (2.14)$$

где

$$D_S = \frac{\partial \varepsilon}{\partial S} \Delta_S = \frac{\Delta_S}{S} \varepsilon = \overline{\Delta_S} \varepsilon \quad (2.15)$$

$D_S$  - частная погрешность из-за разброса значений коэффициента тензочувствительности  $S$ , значение которого вводится как среднее значение для партии тензорезисторов;

$D_\varphi, D_{\varphi_0}$  - частные погрешности отсчетов  $\varphi$  и  $\varphi_0$ .

Погрешность в формуле (2.15) определяется из предположения, что случайные ошибки измерения при определении значений подчинены нормальному закону распределения.

При выборе надежности доверительной оценки для статистической обработки результатов эксперимента использовалось правило: отклонение истинного значения измеряемой величины от среднего арифметического значения результатов измерений не превосходит удвоенной средней квадратичной ошибки этого среднего значения.

То есть, для оценки погрешности

$$\overline{\Delta}_S \leq 2\sigma_S, \quad (2.16)$$

где  $\sigma_S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}$  - среднеквадратичное отклонение величины S;

n - число тензорезисторов в оцениваемой партии;

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.17)$$

- среднеарифметическое значение величины.

Для оцениваемой партии проволочных тензорезисторов из 40 штук, изготовленных на заводе опытных конструкций изделий и оборудования ЦНИИСК:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{1}{40-1} [(1,95 - 2,00)^2 + (1,97 + 2,00)^2 + \dots + (2,06 - 2,00)^2]} = 0,0252,$$

$$\Delta_S = 0,0252 \cdot 2 = 0,0504$$

Частная погрешность из-за разброса величины S используемых тензорезисторов при максимальном уровне деформаций  $1000 \cdot 10^{-5}$  будет равна

$$D_S = \overline{\Delta}_S \varepsilon = 0,0504 \cdot 1000 \cdot 10^{-5} = 50,4 \cdot 10^{-5}.$$

Суммарная погрешность выбранного тензометрического метода измерения деформаций равна (погрешности снятия отсчетов  $D_\phi$ , и  $D_{\phi 0}$  по шкале применяемого прибора АИД-4М приняты в соответствии с инструкцией прибора  $+1,0 \cdot 10^{-5}$  е.о.д.)

$$\Delta_\varepsilon = \frac{1}{1000 \cdot 10^{-5}} \sqrt{(50,4 \cdot 10^{-5})^2 + (2 \cdot 10^{-5})^2 + (2 \cdot 10^{-5})^2} = 0,05044$$

или 5.04%, что обеспечивает требуемую (не более 6% [209]) точность измерения.

Результаты вычисления погрешностей измерения величин относительных деформаций представлены в табл.2.1 согласно ГОСТ 8.011-72.

Таблица 2.1

Таблица результатов измерений

Измеряемая величина	$\varepsilon$	$\Delta$	$\Delta_H$	$\Delta_B$	P
Деформация	$1000 \cdot 10^{-5}$	$50 \cdot 10^{-5}$	$-25 \cdot 10^{-5}$	$+25 \cdot 10^{-5}$	0,95

**НДС ездовых балок двутаврового сечения мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК».** В процессе испытаний ездовых балок двутаврового сечения мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК» изучали кинетику напряженно-деформированного состояния материала в характерных сечениях ездовых балок, в элементах крепления диафрагм, а также для сравнения и анализа – в элементах главных ферм.

Обработка результатов эксперимента показала следующее:

Напряженно-деформированное состояние ездовой балки.

Исследования проводились для сечения ездовой балки в узле Н10 по оси 5 (см. рис.2.2, 2.3). Установлено, что при непосредственном загрузении участка ездовой балки грузовой тележкой, расположенной в осях 6-7-8 (тележка над главной опорой, положение II) (см. рис.1.10), размах главных сжимающих напряжений  $\Delta\sigma_2$  превышает предел текучести  $\sigma_T=2520 \text{ кгс/см}^2$ , чему способствует также начальная деформация балки, наличие накладки и элементов усиления по стенке, а также местное давление катка тележки мостового перегружателя. Размах главных растягивающих напряжений при этом  $\Delta\sigma_1=0,9\Delta\sigma_T$ .

Распределение относительных деформаций по стенке ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК» представлено на рис.2.8.

В нижней части стенки и нижнем поясе ездовой балки размах главных растягивающих напряжений находится в пределах  $0,08-0,28 \sigma_T$ , а главных сжимающих напряжений  $0,03-0,06 \sigma_T$  при этом же нагружении.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что выполненные элементы усиления приводят к существенному изменению напряженного состояния сечения, при этом элементы усиления (накладки) сами являются мощным концентратором напряжений. В случае неправильного выполнения элементы усиления способны вызвать ускоренное разрушение.

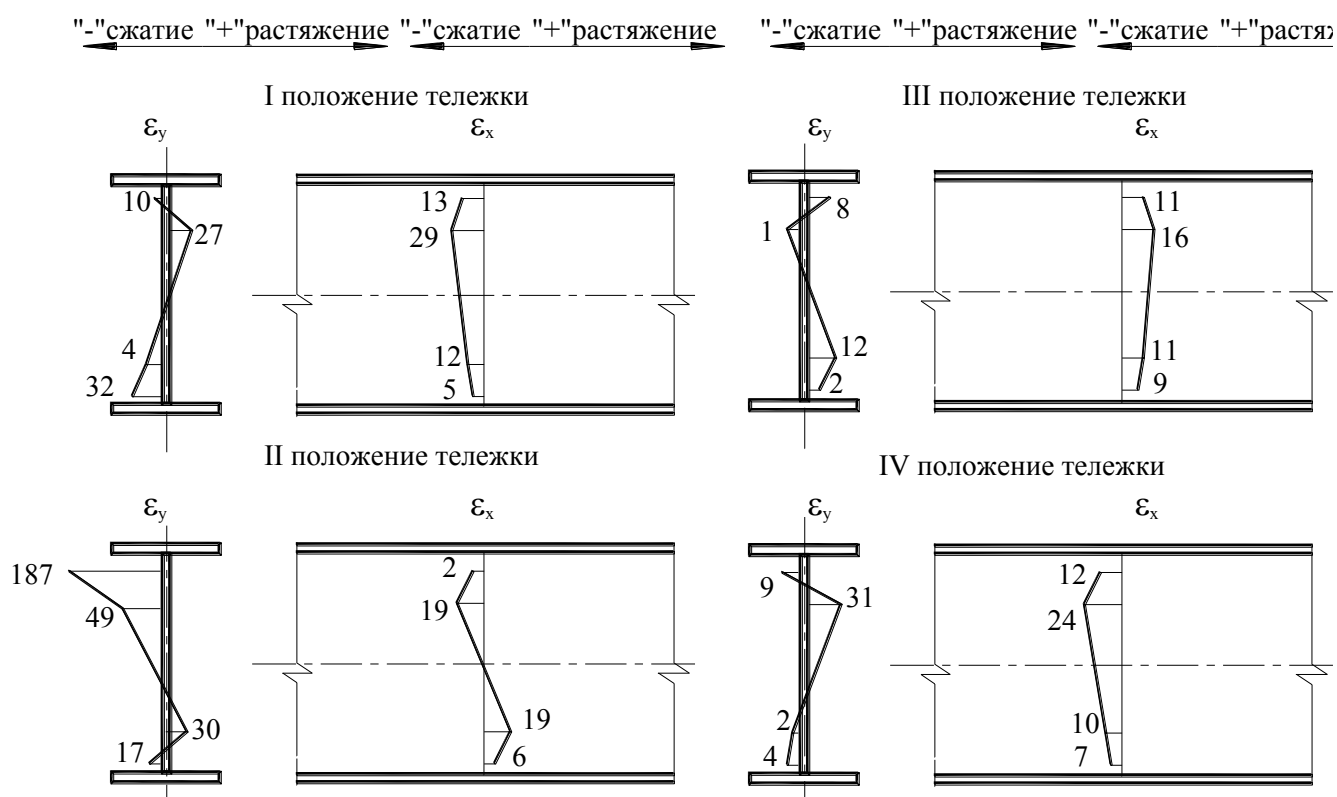


Рис. 2.8. Эпюры распределения относительных деформаций ( $\epsilon_{e.o.d.} \times 10^{-5}$ ) по стенке ездовой балки мостового перегружателя №2 КХП ОАО «ММК»



*Напряженно-деформированное состояние стенки ездовой балки в зоне усиления короткими ребрами жесткости.* Изучение кинетики напряженно-деформированного состояния стенки ездовой балки, усиленной коротким ребром жесткости, производилось в узле по оси «5» (см. рис.2.3). Максимальный размах главных растягивающих напряжений  $\Delta\sigma_1$  у конца ребра достигал величины  $0,44\sigma_T$ , а у его основания  $0,6\sigma_T$  и отмечен при загрузке жесткой опоры тележкой с грузом (положение II, см. рис.1.10). При усилении накладке по стенке балки дополнительным коротким поперечным ребром жесткости по оси «10» напряжения не существенны и, следовательно, постановка этого ребра не эффективна.

Напряженно-деформированное состояние материала в зоне расположения трещины.

Изучение НДС стенки ездовой балки, имеющей трещины в месте соединения с поясом и в накладке по стенке (см. рис.2.1), производилось в узле Н16 по оси «7» (см. рис.1.10). При положении грузовой тележки над жесткой опорой (положение II) максимальный размах главных растягивающих напряжений в стенке достигал величины  $0,49-0,77\sigma_T$ .

В вершине заваренной трещины, расположенной справа от оси «7» (см. рис.2.1), размах растягивающих напряжений достигал величины  $0,25\sigma_T$  при загрузке консоли мостового перегружателя со стороны жесткой опоры (положение I). Однако говорить о явном эффекте заварки трещин на снижение напряжений в вершине трещины не приходится, так как сопоставляемые трещины находились в разных сечениях и имели разную длину.

Напряженное состояние в элементах крепления диафрагм.

Исследования проводились на узлах крепления ездовой балки по осям «6» и «10» (см. рис.2.4) в центре жесткой опоры и в центре пролета к узлам западной главной фермы. При расположении тележки с грузом над жесткой опорой (положение II) максимальный размах главных растягивающих напряжений в уголках крепления вертикальных диафрагм по оси «5» достигает величины  $\Delta\sigma_1 = 0,6-0,66\sigma_T$ . При расположении тележки с грузом в средней части пролета (положение III) данная величина для уголков крепления вертикальных диафрагм равна  $\Delta\sigma_1 = 0,1-0,54\sigma_T$ .

Напряженное состояние в элементах главной фермы.

Эксперимент показал, что максимальный размах главных напряжений в главной фермы не превышал следующих величин:

- верхний пояс (элемент В13-В15)                    -  $0,8 \sigma_T$ ;
- нижний пояс (элемент Н20-Н22)                    -  $0,6 \sigma_T$ ;
- опорный раскос (элемент В33-Н34)                -  $0,5 \sigma_T$ .

Таким образом, в результате изучения напряженно-деформированного состояния элементов крана-перегрузателя №2 КХП ОАО «ММК» установлено, что наиболее нагруженным элементом является ездовая балка, например, в сечении 1-1 у жесткой опоры со стороны консоли по оси «4» отмечен размах напряжений, превышающий предел текучести материала. В остальных сечениях ездовой балки напряжения изменяются в диапазоне до  $0,8 \sigma_T$ .

В уголках крепления вертикальных диафрагм максимальный размах главных растягивающих напряжений достигает величины  $0,7 \sigma_T$ .

***НДС ездовых балок коробчатого сечения мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК».*** В процессе испытаний изучена кинетика НДС в характерных сечениях ездовой балки, в узлах крепления ездовых балок. Обработка результатов испытаний показала следующие результаты:

*Напряженно-деформированное состояние в элементах коробчатой балки со стороны гибкой опоры.* Максимальные значения главных растягивающих напряжений в верхнем поясе достигают  $1338,7 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,45\sigma_T$ ) при загрузке гибкой опоры тележкой с грузом. Главные сжимающие напряжения достигают величины  $-3367,5 \text{ кгс/см}^2$  ( $1,01\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом. Значения растягивающих напряжений изменяются от  $315,1 \text{ кгс/см}^2$  (положение I) (см. рис. 1.12) до  $1338,7 \text{ кгс/см}^2$  (положение IV).

Максимальные значения главных растягивающих напряжений в нижнем поясе достигают  $2465,9 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,8\sigma_T$ ) при загрузке жесткой опоры тележкой с грузом. Главные сжимающие напряжения достигают величины  $-404,7 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,14\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом. Значения растягивающих напряжений изменяются от  $8,4 \text{ кгс/см}^2$  (положение I) до  $2465,9 \text{ кгс/см}^2$  (положение II).

Эпюры напряжений представлены на рис.2.9, 2.10.

Максимальные значения главных сжимающих напряжений в западной стенке достигают  $-2500,1 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,8\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом. Значения сжимающих напряжений изменяются от  $-146,8 \text{ кгс/см}^2$  (положение II) до  $-2500,1 \text{ кгс/см}^2$  (положение V).

Максимальные значения главных сжимающих напряжений в восточной стенке достигают  $-2341,9 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,8\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом.

Наибольший перепад напряжений наблюдается в зоне усиливающей накладки в точке №6 от  $-2500,2 \text{ кгс/см}^2$  при загрузке консоли со стороны гибкой опоры до  $42,6 \text{ кгс/см}^2$  при загрузке гибкой опоры. Величина перепада составляет  $\Delta\sigma = 2542,8 \text{ кгс/см}^2$ .

*Напряжения в элементах восточной коробчатой балки пролетной части моста.* Максимальные значения главных сжимающих напряжений в верхнем поясе достигают  $-1434,3 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,5\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны жесткой опоры тележкой с грузом. Значения сжимающих напряжений изменяются от  $-272,2 \text{ кгс/см}^2$  (положение II) до  $-1434,3 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,5\sigma_T$ ) (положение I).

Максимальные значения главных растягивающих напряжений в нижнем поясе достигают  $2420,4 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,8\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны жесткой опоры тележкой с грузом. Главные сжимающие напряжения достигают величины  $-1250,2 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,4\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом. Значения растягивающих напряжений изменяются от  $69,1 \text{ кгс/см}^2$  (положение III) до  $2420,4 \text{ кгс/см}^2$  (положение I). Значения сжимающих напряжений изменяются от  $-95,6 \text{ кгс/см}^2$  (положение I) до  $-1250,1 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,4\sigma_T$ ) (положение V).

Максимальные значения главных сжимающих напряжений в западной стенке достигают  $-1271,3 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,4\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом. Значения сжимающих напряжений изменяются от  $-325,1 \text{ кгс/см}^2$  (положение II) до  $-1271,3 \text{ кгс/см}^2$  (положение V).

Максимальные значения главных сжимающих напряжений в восточной стенке достигают  $-1037,6 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,35\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом. Значения сжимающих напряжений изменяются от  $-39,8 \text{ кгс/см}^2$  (положение I) до  $-1037,6 \text{ кгс/см}^2$  (положение V).

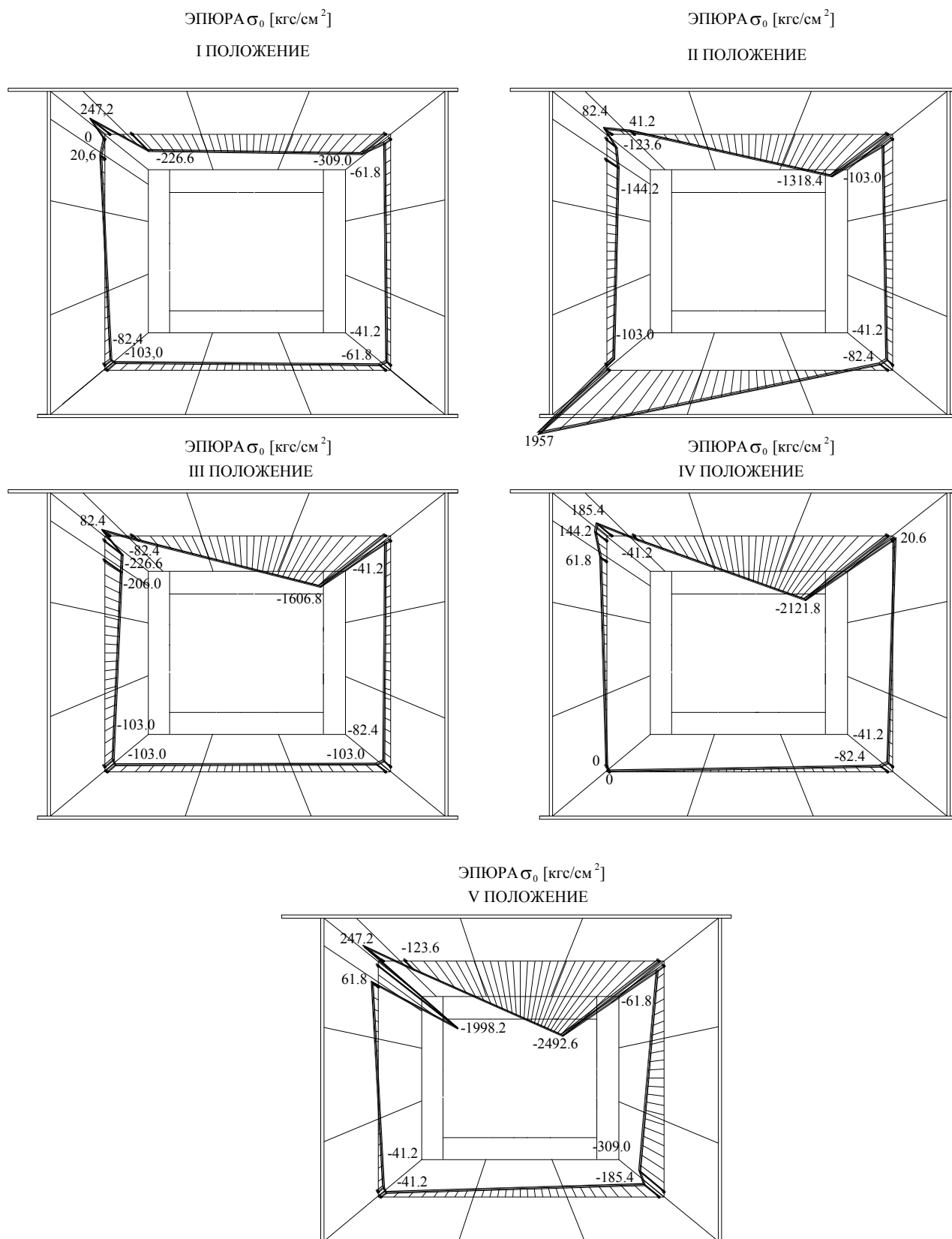


Рис. 2.9. Эпюры компонент напряжений в элементах коробчатой балки мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК» со стороны гибкой опоры

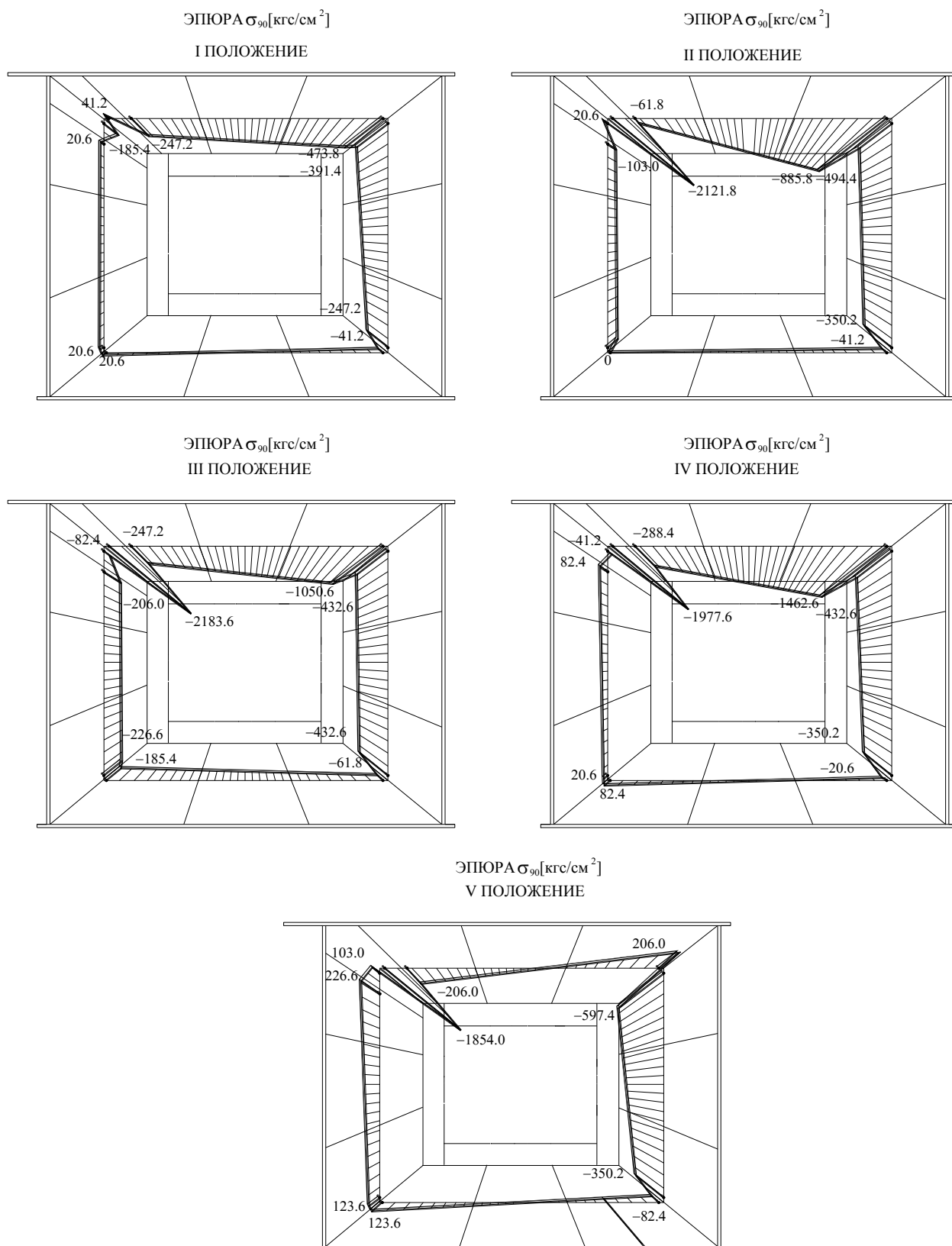


Рис. 2.10. Эпюры компонент напряжений в элементах коробчатой балки мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК» со стороны гибкой опоры

Наибольший перепад напряжений наблюдается в точке №11 от  $2420,4 \text{ кгс/см}^2$  при загрузке консоли со стороны жесткой опоры до  $-277,8 \text{ кгс/см}^2$  при загрузке гибкой опоры. Величина перепада составляет  $\Delta\sigma = 2698,2 \text{ кгс/см}^2$ .

Эпюры напряжений представлены на рис.2.11, 2.12.

*Напряжения в элементах восточной коробчатой балки со стороны жесткой опоры.* Значительных перепадов в элементах восточной коробчатой балки со стороны жесткой опоры не наблюдается. Максимальные значения главных растягивающих напряжений достигают значения  $564,6 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,19\sigma_T$ ) при загрузке гибкой опоры тележкой с грузом. Максимальные значения главных сжимающих напряжений достигают значения  $-634,2 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,2\sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны жесткой опоры тележкой с грузом.

Значения величин компонент деформаций и главных деформаций, а также значения компонент напряжений, главные напряжения и направления их осей приведены в приложении.

**НДС ездовых балок коробчатого сечения мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК».**

*Напряжения в элементах коробчатой балки со стороны жесткой опоры.* Максимальные значения главных сжимающих напряжений в верхнем поясе достигают  $2164,4 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,7 \sigma_T$ ) при загрузке жесткой опоры тележкой с грузом. Главные сжимающие напряжения достигают величины  $549 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,2 \sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом.

Максимальные значения главных растягивающих напряжений в зоне крепления наклонной ламели к стенке достигает  $949 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,3 \sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны жесткой опоры тележкой с грузом.

В углах крепления ребер жесткости к диафрагмам уровень напряжений не значителен. Наибольшее напряжение составляет  $462 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,15 \sigma_T$ ).

Эпюры компонент напряжений элементов коробчатой балки пролетной части моста представлены на рис. 2.13.

Максимальные значения главных растягивающих напряжений получены у концов трещины  $3227 \text{ кгс/см}^2$  ( $1,02 \sigma_T$ ) и  $2294 \text{ кгс/см}^2$  ( $0,7 \sigma_T$ ) при загрузке консоли со стороны жесткой опоры тележкой с грузом.

Максимальный перепад напряжений от  $1323 \text{ кгс/см}^2$  до  $-1020 \text{ кгс/см}^2$  выявлен при загрузке консоли со стороны жесткой опоры, величина перепада составляет  $\Delta\sigma = 2343 \text{ кгс/см}^2$  и от  $419 \text{ кгс/см}^2$  до  $-2438 \text{ кгс/см}^2$ , что составляет  $\Delta\sigma = 2857 \text{ кгс/см}^2$ .

**НДС ездовых балок двутаврового сечения мостового перегружателя Петропавловской ТЭЦ-2.** В процессе испытаний мостового перегружателя изучалась кинетика НДС состояния материала в характерных сечениях ездовой балки, в элементах крепления диафрагм, а также для более полной картины о работе ездовых балок – в элементах главной фермы.

*Напряженно-деформированное состояние ездовых балок двутаврового сечения.* Эксперимент показал, что в пролетной части моста ездовые балки работают при знакопеременном нагружении. Так размах напряжений от воздействия грузовой тележки меняется от  $\Delta\sigma=1400 \text{ кгс/см}^2$  до  $\Delta\sigma = -800 \text{ кгс/см}^2$  ( $\Delta\sigma= 0,60-(-0,34) \Delta\sigma_T$ , при  $\sigma_T = 2350 \text{ кгс/см}^2$ ). При этом наиболее нагруженным является сечение 4 - 4 (см. рис.1.16), в котором размах напряжений в зоне сопряжения пояса со стенкой превышает предел текучести.

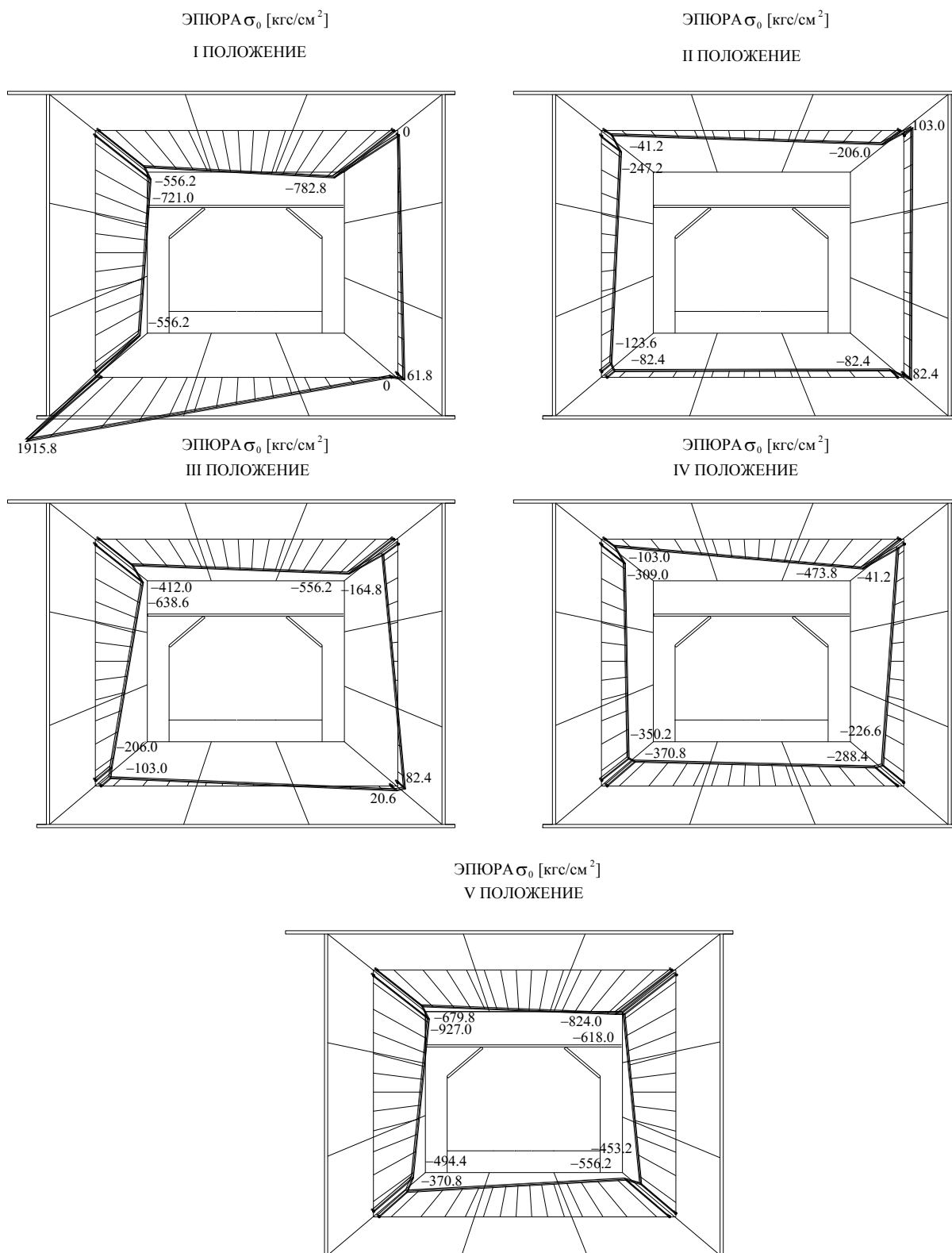


Рис. 2.11. Эпюры компонент напряжений в элементах коробчатой балки мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК» пролетной части моста

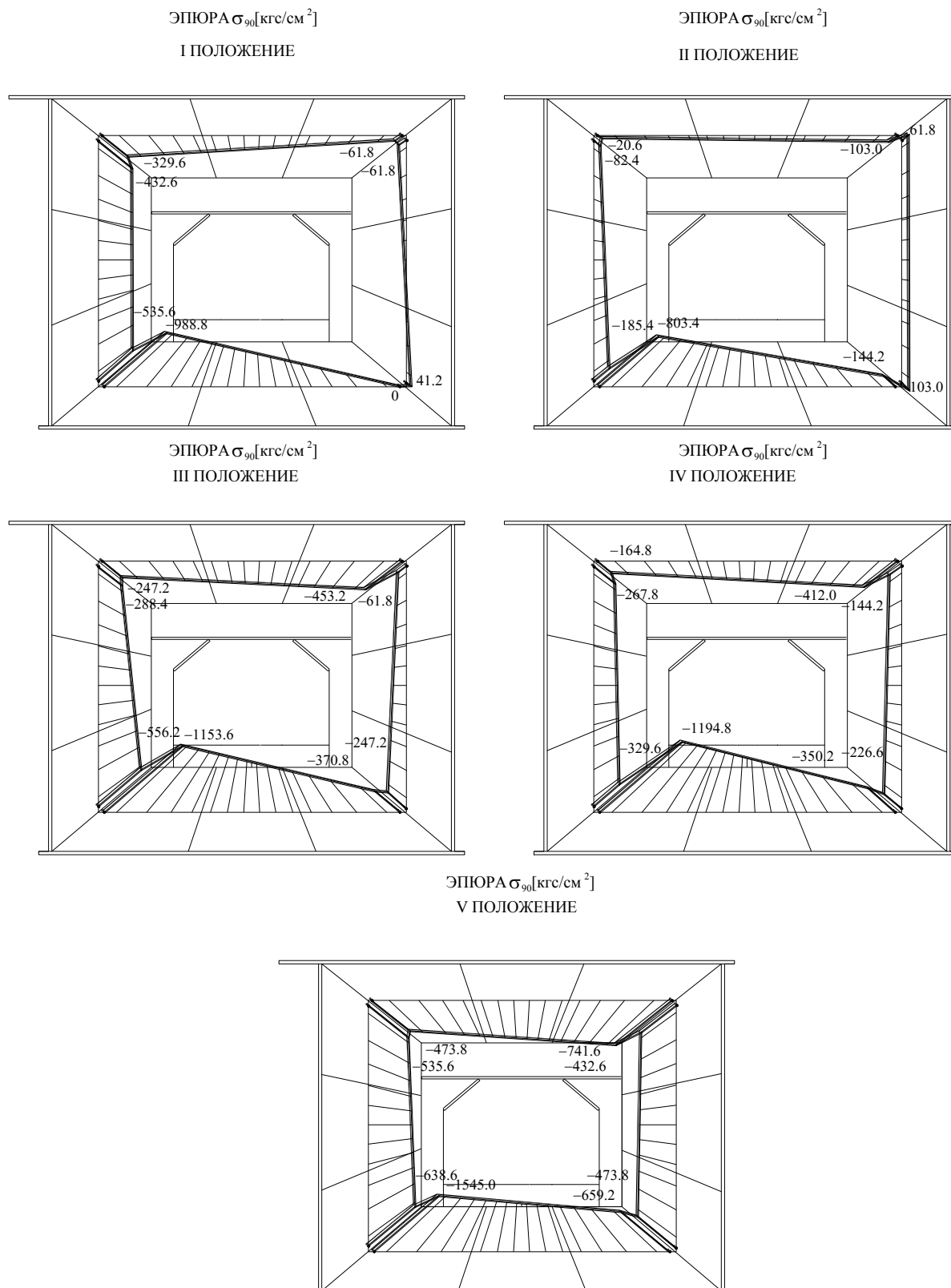
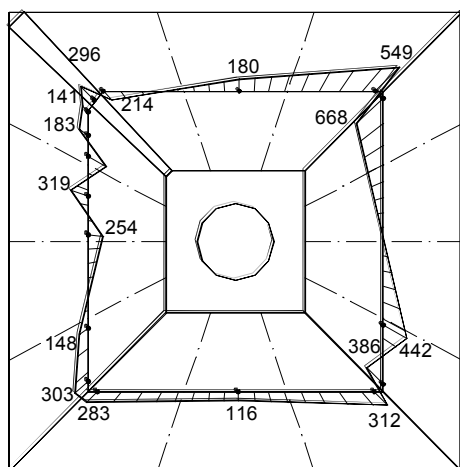


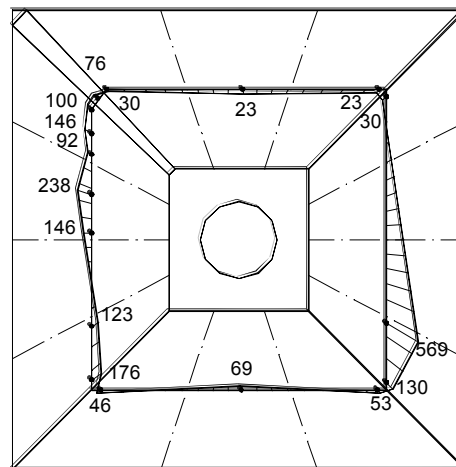
Рис. 2.12. Эпюры компонент напряжений в элементах коробчатой балки мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК» пролетной части моста

### I ПОЛОЖЕНИЕ

ЭПЮРА  $\sigma_0$  [кгс/см<sup>2</sup>]

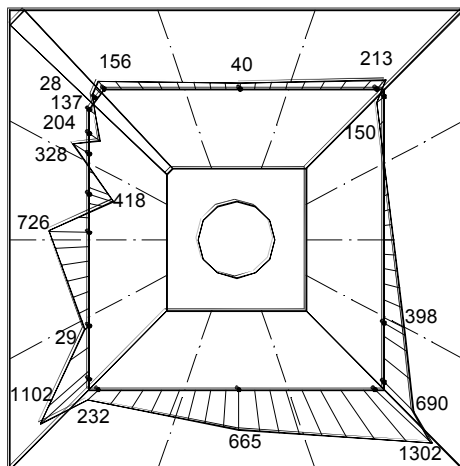


ЭПЮРА  $\sigma_{90}$  [кгс/см<sup>2</sup>]

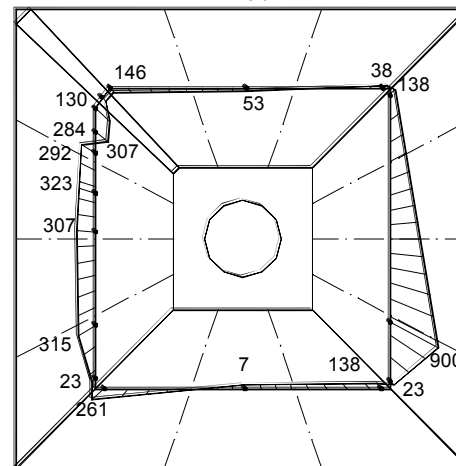


### III ПОЛОЖЕНИЕ

ЭПЮРА  $\sigma_0$  [кгс/см<sup>2</sup>]

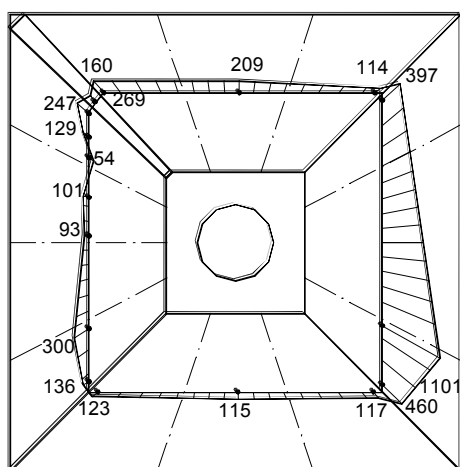


ЭПЮРА  $\sigma_{90}$  [кгс/см<sup>2</sup>]



### IV ПОЛОЖЕНИЕ

ЭПЮРА  $\sigma_0$  [кгс/см<sup>2</sup>]



ЭПЮРА  $\sigma_{90}$  [кгс/см<sup>2</sup>]

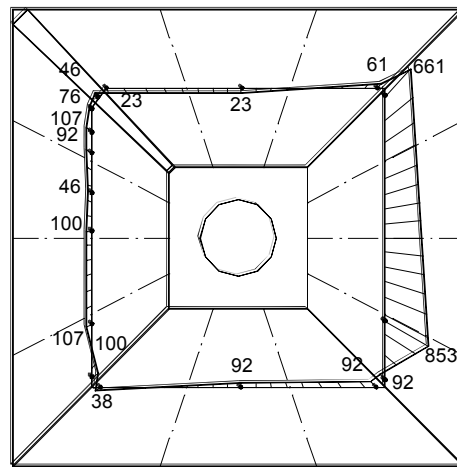


Рис. 2.13. Эпюры компонент напряжений в элементах коробчатой балки мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК» пролетной части моста



В остальных исследуемых сечениях ездовой балки материал деформируется при знако-постоянном нагружении, и размах напряжений от воздействия грузовой тележки изменяется в диапазоне  $\Delta\sigma = 0,05-0,8\Delta\sigma_T$ .

Напряженно-деформированное состояние узлов крепления ездовых балок

Уголки крепления вертикальных диафрагм к узлам нижнего пояса главной фермы перенапряжены – размах напряжений превышает предел текучести. При этом максимальными напряжениями являются горизонтальные компоненты нормальных напряжений  $\sigma_x = 1480 \text{ кгс/см}^2$ , размах напряжений от воздействия грузовой тележки составляет  $\Delta\sigma = 3330 \text{ кгс/см}^2$ . Таким образом, циклическое изменение горизонтальных компонент нормальных напряжений  $\sigma_x$  приводит к образованию у обуха уголков усталостных трещин, зарождающихся от дефектов газовой резки торцов уголков крепления.

Эксперимент показал, что заварка трещины не привела к существенному снижению напряжений в уголках крепления вертикальных диафрагм, а размах напряжений в вершине заваренной трещины также превышал величину  $\sigma_T$ , как и в вершине незаваренной трещины.

*Напряженно-деформированное состояние в элементах гибкой и жесткой опор крана и в элементах пролетных ферм – поясов и решетки.* Эксперимент показал:

1. В верхнем поясе большей консоли (элемент В3-В4, см. рис.1.16) размах растягивающих напряжений изменяется в пределах  $0,05-0,12 \sigma_T$ .
2. Размах напряжений в нижнем поясе пролетных ферм максимален при загрузке грузовой тележкой пролетной части моста и достигает величины  $\Delta\sigma = 0,62-0,9\sigma_T$ .
3. Размах растягивающих напряжений в элементах решетки пролетных ферм в средних раскосах не превышает величины  $\Delta\sigma \leq 0,72\sigma_T$ . В опорном раскосе В6-Н7  $\Delta\sigma = -0,33-(-0,86) \sigma_T$ . В опорных раскосах Н19-В18 и Н19-В20 у гибкой опоры размах напряжений при наиболее неблагоприятных загрузках изменяется в пределах  $\Delta\sigma = 0,29-(-0,35) \sigma_T$  и  $0,30-0,39 \sigma_T$ .
4. В основном элементе жесткой опоры при непосредственном ее загрузке размах сжимающих напряжений лежит в пределах  $\Delta\sigma = -0,29-(-0,37) \sigma_T$ .
5. В элементе Г2-Г3 гибкой опоры максимальный размах растягивающих напряжений отмечен при расположении тележки с грузом на консоли со стороны жесткой опоры и достигает величины  $0,26-0,42 \sigma_T$ .

Эксперимент показал, что из всех исследуемых конструкций мостового перегружателя наиболее нагруженными элементами являются ездовая балка и узлы крепления опорных вертикальных диафрагм ездовых балок к нижним поясам главных ферм.

Таким образом, характерной особенностью эксплуатации мостовых перегружателей является наличие усталостных разрушений узлов, что обусловлено:

- 1) циклическим характером нагрузки при большой интенсивности загрузки - до 1200-1700 циклов в сутки при круглосуточной работе;
- 2) высоким уровнем средних напряжений цикла;
- 3) большим размахом напряжений в цикле и коэффициентом асимметрии цикла  $R \leq 0$ ;
- 4) наличием исходных технологических концентраторов напряжений и зон концентрации напряжений;
- 5) влиянием дополнительных факторов, ускоряющих процесс усталостных разрушений – низких температур эксплуатации, перекосов моста по высоте и в плане, механическими повреждениями элементов и др.;

б) неквалифицированным выполнением усиления;

7) конструктивными ошибками проекта такими, как пересечение сварных швов, соединяющих стенки балки и пояса со сварными швами поперечных диафрагм жесткости, пересечение стыковых сварных швов уголков жесткости балок со сварными швами, крепящими уголки к поясам и стенкам балок и т.д.

В ходе экспериментального изучения НДС конструкций и узлов мостовых перегружателей отмечено также, что материал в каждой из исследуемых зон, даже в пределах одного сечения, деформируется при индивидуальном размахе деформаций (напряжений) и индивидуальном коэффициенте асимметрии цикла. При этом материал деформируется в условиях плоского напряженного состояния, а усталостные трещины развиваются как вдоль, так и поперек направления прокатки листов.

## 2.2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

В работе одновременно с изучением НДС материала в исследуемых зонах измерялись прогибы конструкций при заданном положении груза.

Наблюдение за перемещением узлов конструкций выполнялось методом геометрического нивелирования нивелиром НЗ с использованием шашечной рейки и ценой деления 10 мм.

Угол между визирной осью зрительной трубы и осью цилиндрического уровня был приведен к значению  $i = 3$ , что соответствует погрешности измерения вертикальных перемещений узлов конструкций в 1 мм.

Нивелирование осуществлялось по маркам, расположенным в узлах нижнего пояса каждой из главных ферм мостовых перегружателей с решетчатой конструкцией и в узлах крепления подвески для мостового перегружателя с комбинированной системой пролетного строения. Измерения производились для пяти характерных положений тележки с грузом, что и при проведении тензометрических испытаний (см. рис.1.10, 1.12). Для каждого нагружения выполнялось до 5 серий наблюдений.

Наблюдения за перемещениями опор мостовых перегружателей выполнялись методом бокового визирования при помощи теодолита Т-5. Каждая опора наблюдалась в трех сериях при различном положении нагруженной тележки. Погрешность определения положения точек опор мостовых перегружателей не превышала  $\pm 2$  мм.

### *Схемы деформирования ездовых балок мостовых перегружателей.*

#### *Мостовые перегружатели КХП ОАО «ММК».*

В ходе экспериментального изучения деформированного состояния пролетных строений мостовых перегружателей КХП ММК геодезическими методами были получены следующие данные:

Деформативность консоли ездовых балок со стороны гибкой опоры мостового перегружателя №4:

Максимальные значения прогибов консоли со стороны гибкой опоры наблюдаются при ее непосредственном нагружении тележкой с грузом (положение I): для западной балки 92 мм (0,0024l), восточной – 96,5 мм (0,0025l) (рис.2.14), перекося конечной части консоли составляет (0,0006l). Максимальные значения прогибов обратного направления (выгибов) конечной части консоли наблюдается при нагружении пролетной части моста тележкой с грузом (положение III) и составляет 23 мм (0,0006l) для западной балки и 12,5 мм (0,0003l) – для восточной.

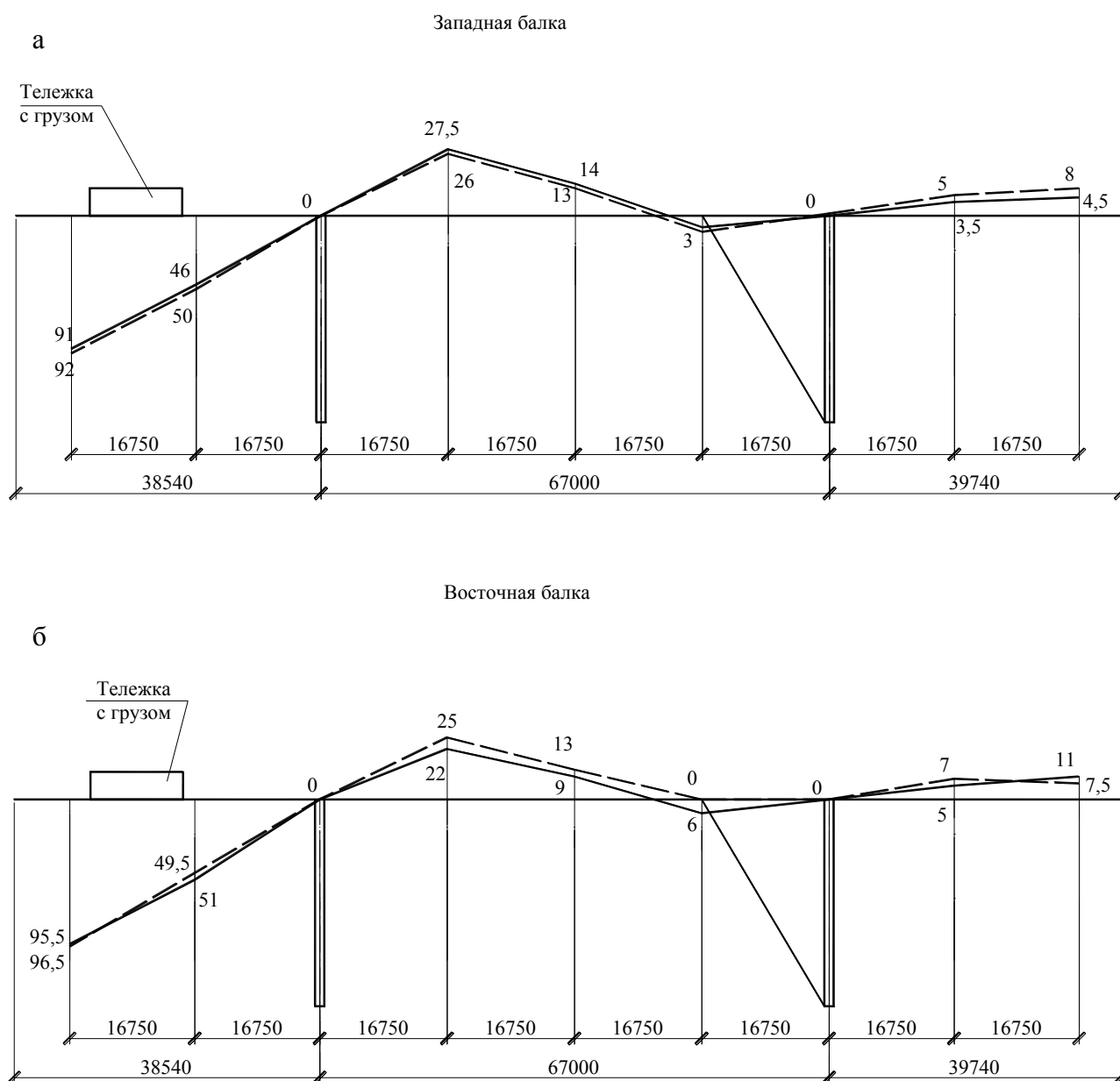


Рис. 2.14. Вертикальные перемещения узлов западной (а) и восточной (б) балки мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК» при максимальном нагружении консоли со стороны гибкой опоры тележкой с грузом

*Деформативность пролетной части ездовых балок мостового перегружателя №4:*

Максимальные прогибы пролетной части наблюдаются при непосредственном нагружении ее тележкой с грузом: для западной балки 30 мм (0,00045ℓ), для восточной – 35,5 мм (0,0005ℓ) (рис.2.15). Выгибы пролетной части наблюдаются при загрузке консольных участков (положения I и V) и достигают 27,5 мм (0,0004ℓ) и 31,5 мм (0,00047ℓ), максимальное значение перекоса в средней части моста крана составляет 0,001ℓ.

*Деформативность консоли ездовых балок со стороны жесткой опоры:*

Максимальные прогибы консоли со стороны жесткой опоры наблюдаются при ее непосредственном нагружении тележкой с грузом (положение V): для западной балки – 90 мм (0,002ℓ), для восточной – 80 мм (0,002ℓ) (рис.2.16), перекося концевой части консоли составляет 0,003ℓ. Максимальные значения выгиба концевой части консоли наблюдаются при загрузке пролетной части моста тележкой с грузом (положение III) и составляет 22 мм (0,006ℓ) для западной балки и 31 мм (0,008ℓ) для восточной, перекося концевой части консоли при таком нагружении составляет 0,0018ℓ.

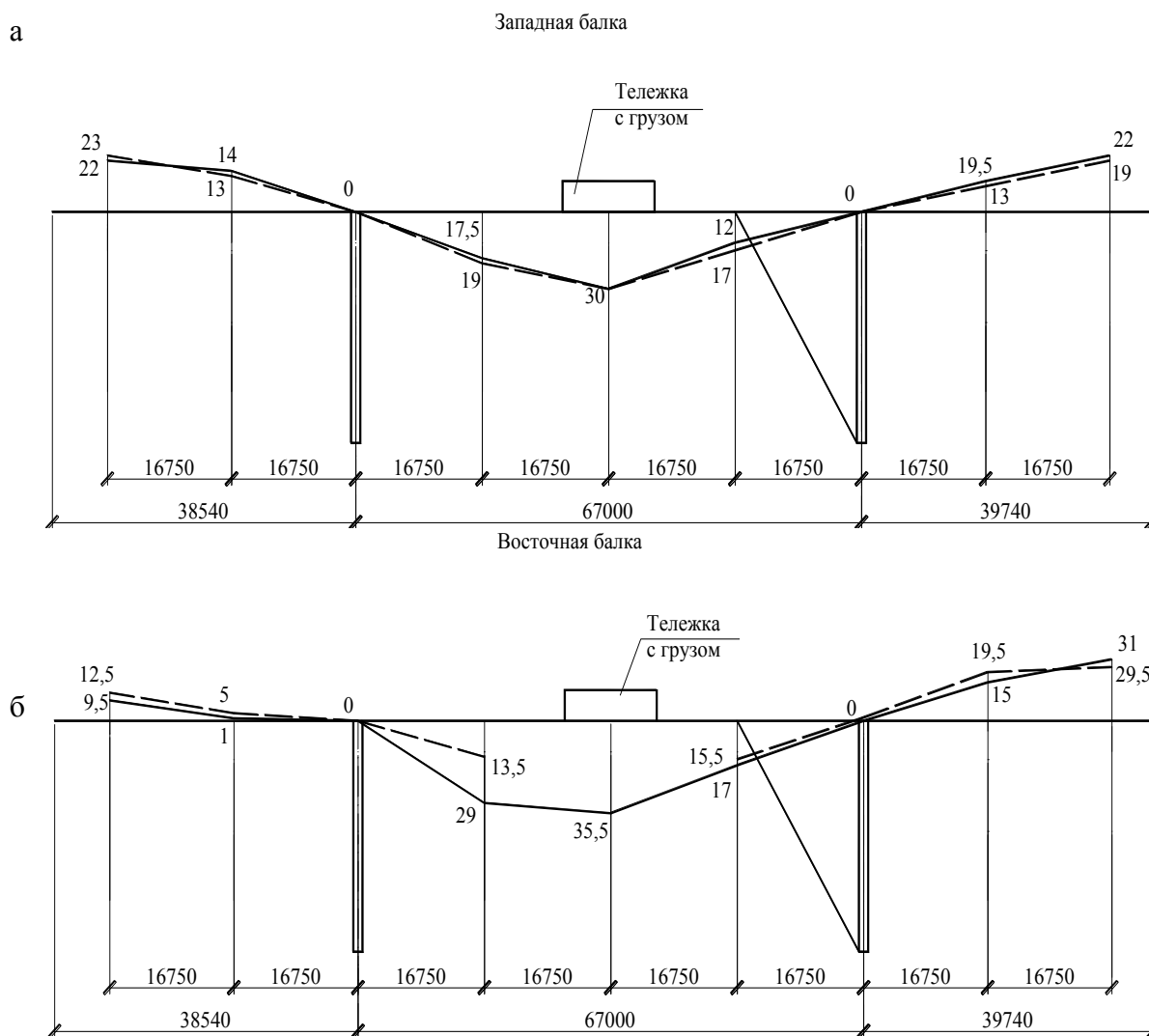


Рис. 2.15. Вертикальные перемещения узлов западной (а) и восточной (б) балки мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК» при загрузке пролетной части тележкой с грузом

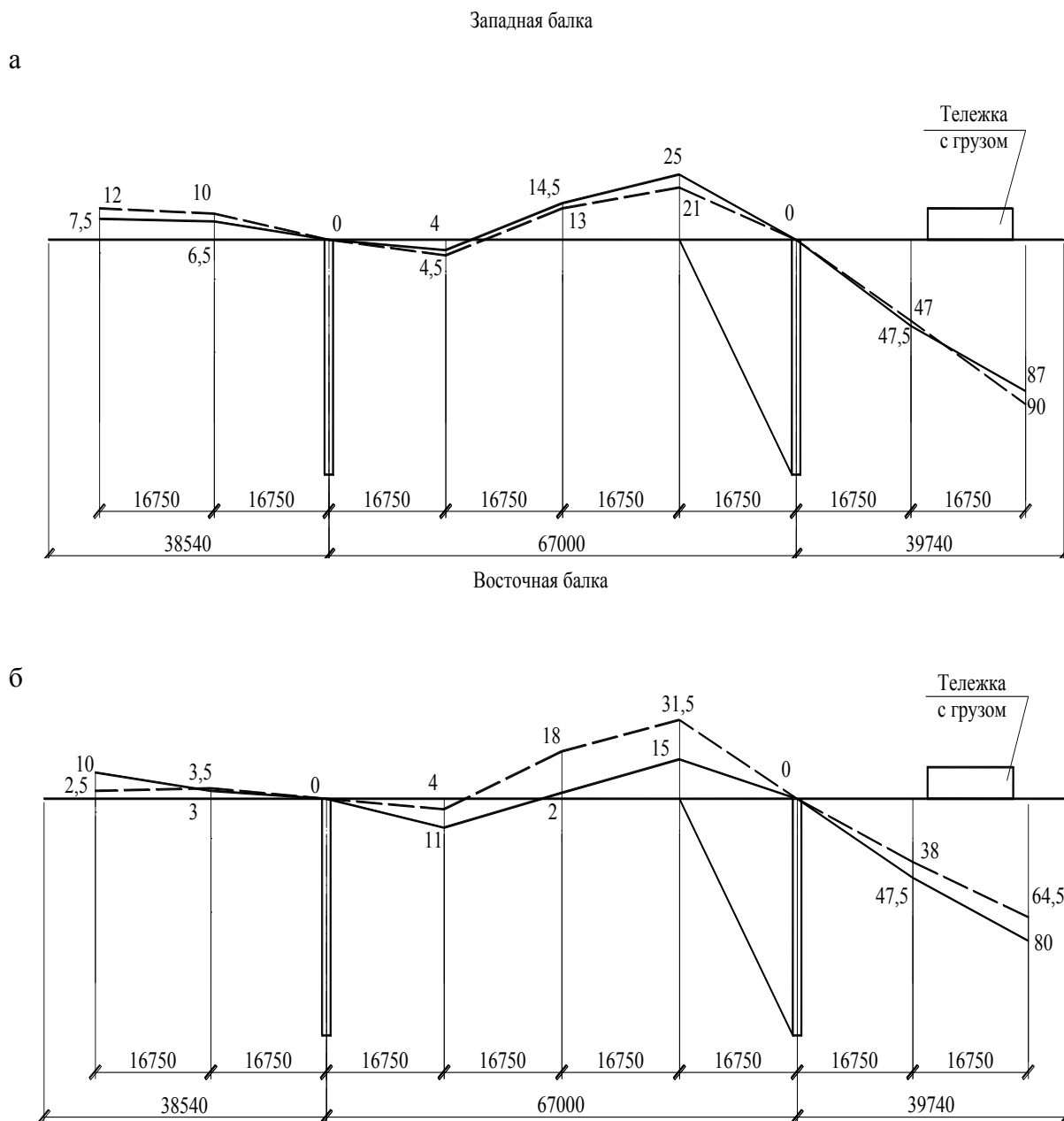


Рис. 2.16. Вертикальные перемещения узлов (мм) западной (а) и восточной (б) балки мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК» при загрузке консоли со стороны жесткой опоры тележкой с грузом

Совместное деформирование балок мостового перегружателя №4 представлено на рис.2.17.

*Деформативность опор мостового перегружателя*

По результатам геодезической съемки установлено, что гибкая опора является более деформативной, чем жесткая. Наибольшая разность вертикальных перемещений гибкой опоры на уровне верхнего пояса коробчатых балок составляет 15 мм при сравнении показаний геодезической съемки, полученных при загрузке консоли со стороны гибкой опоры и пролетной части. Максимальная разность вертикальных перемещений на жесткой опоре лежит в пределах от 2 до 6 мм.

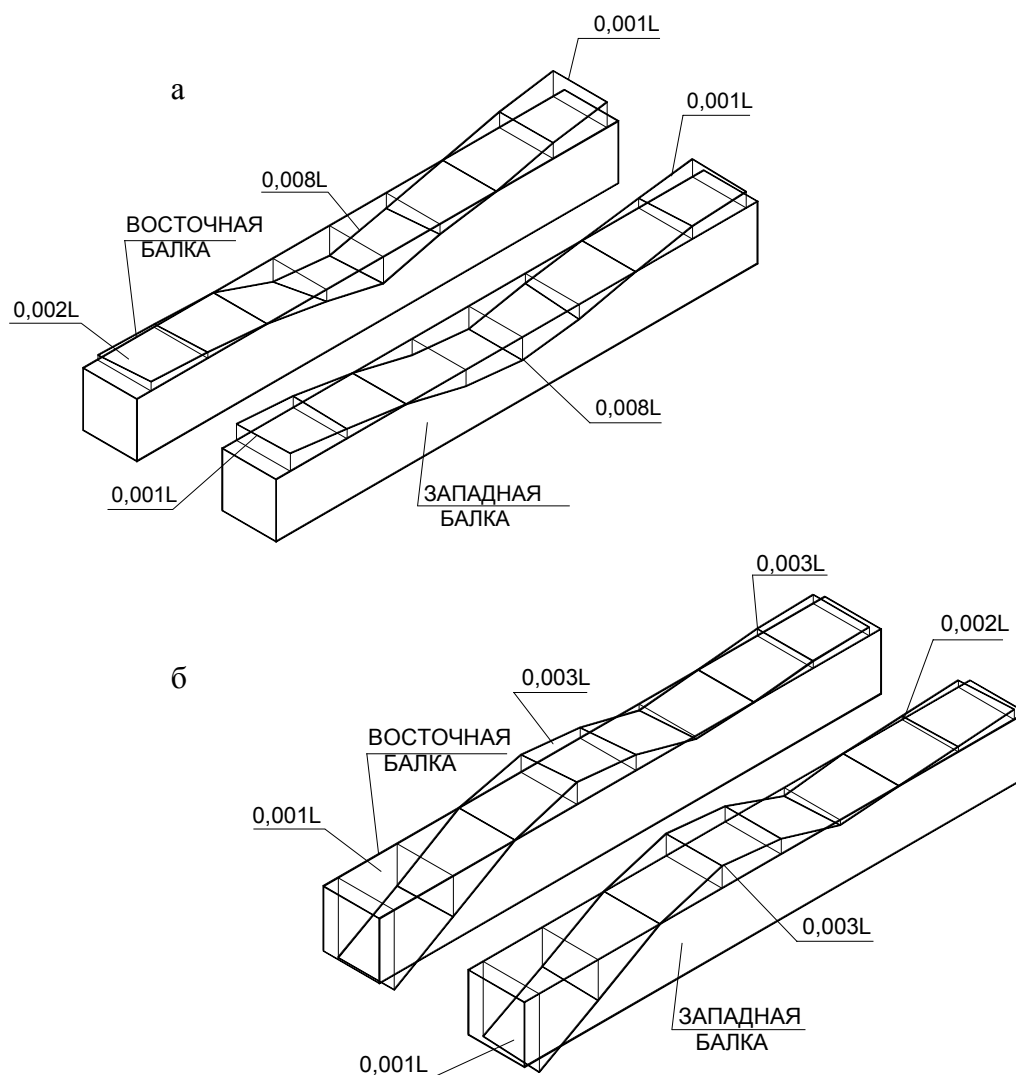


Рис. 2.17. Совместное деформирование балок мостового перегружателя №4 КХП ОАО «ММК»: а – при загрузке консоли со стороны гибкой опоры; б – при загрузке пролетной части моста

### **Мостовой перегружатель Петропавловской ТЭЦ-2.**

#### *Деформативность консоли со стороны жесткой опоры:*

Максимальные прогибы консоли со стороны жесткой опоры наблюдаются при ее непосредственном загрузке тележкой с грузом: для восточной фермы 40 мм, для западной – 58 мм (рис.2.18), перекося конца консоли составляет  $0,0026\ell$ . Максимальное значение прогиба обратного направления (выгиба) консоли наблюдается при загрузке пролетной части моста тележкой с грузом и составляет 21 мм для восточной балки и 14 мм – для западной, перекося составляет  $0,001\ell$ .

#### *Деформативность пролетной части моста мостового перегружателя:*

Максимальные прогибы ездовой балки в пролетной части моста наблюдаются при непосредственном ее загрузке тележкой с грузом: для восточной балки – 22 мм, для западной – 23 мм (рис.2.19). Выгиб пролетной части наблюдается при загрузке консольных участков и достигает 14 мм для восточной балки и 19 мм для западной.

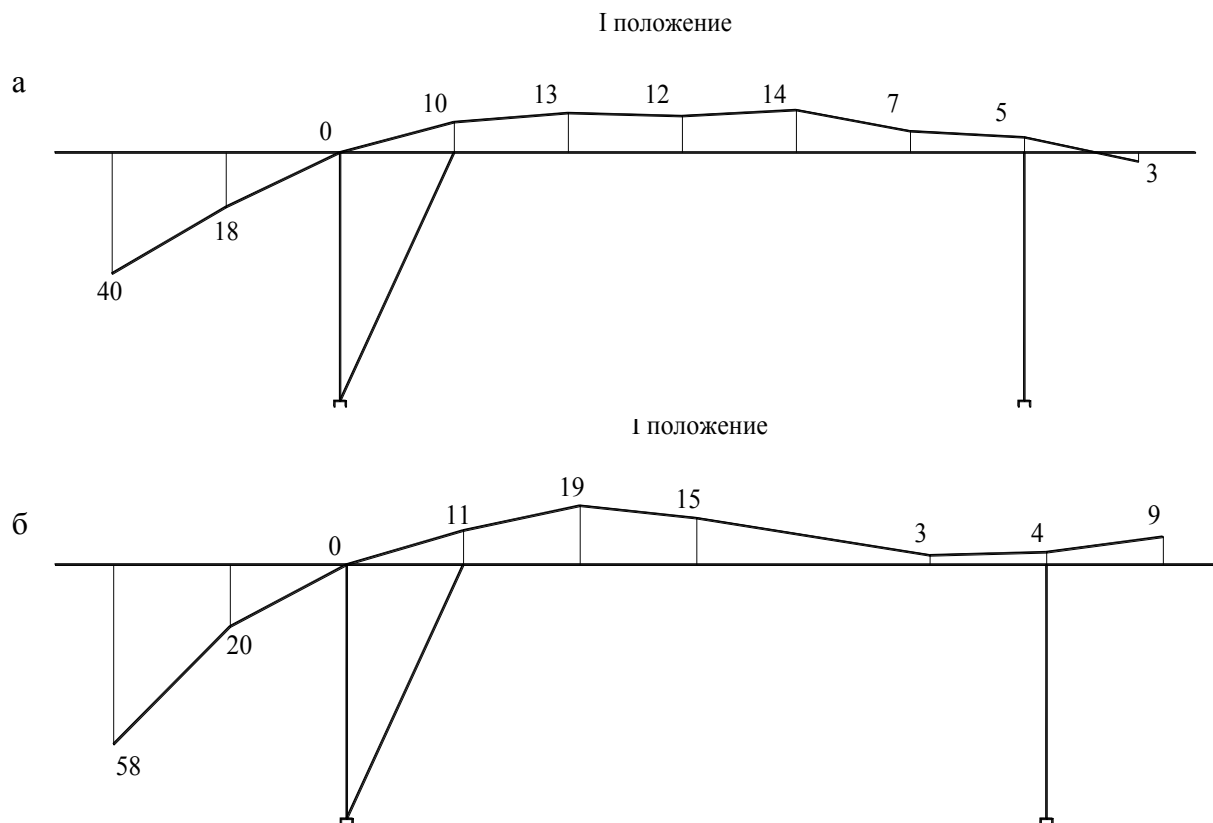


Рис. 2.18. Перемещение узлов (мм) восточной (а) и западной (б) балок мостового перегружателя Петропавловской ТЭЦ-2 при загрузке консоли со стороны гибкой опоры

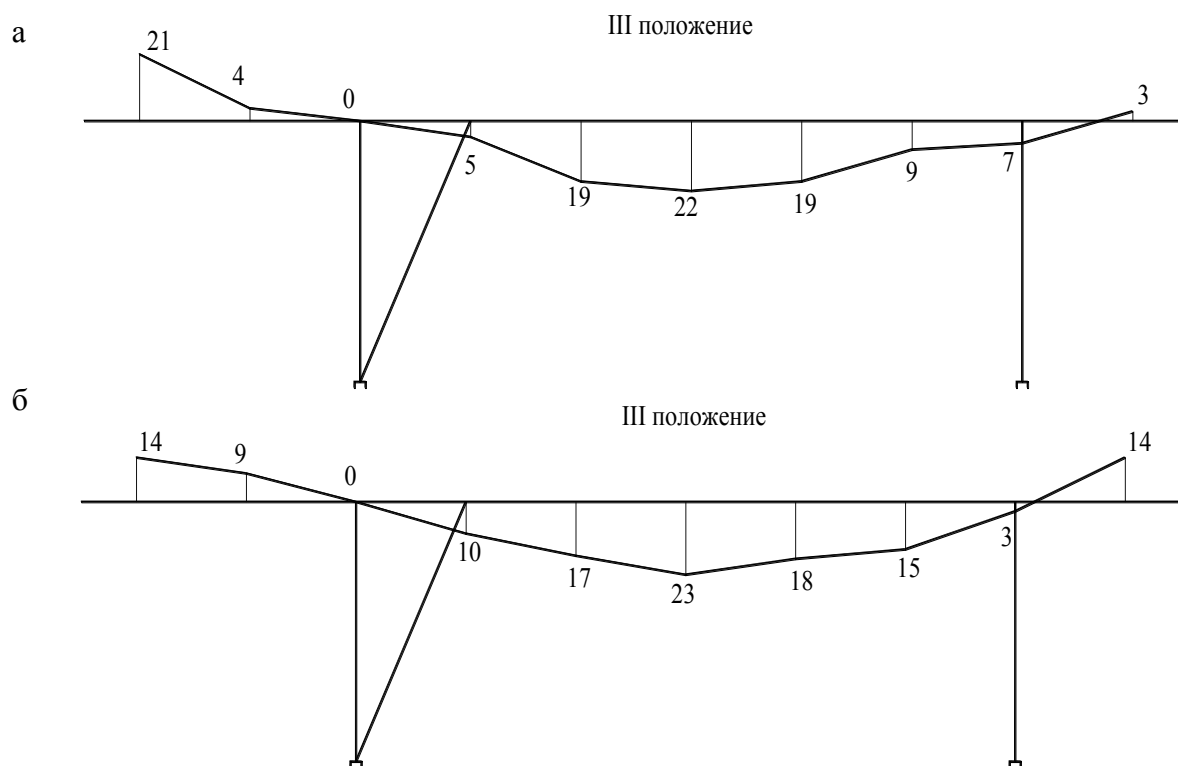


Рис. 2.19. Перемещение узлов (мм) восточной (а) и западной (б) балок мостового перегружателя Петропавловской ТЭЦ-2 при загрузке пролетной части моста

*Деформативность консоли со стороны гибкой опоры:*

Максимальные перемещения концевой части консоли со стороны гибкой опоры составляют 22 мм для восточной фермы при непосредственном ее загрузении тележкой с грузом и 14 мм для западной фермы при загрузении пролетной части моста.

*Деформативность опор части моста мостового перегружателя:*

При расположении тележки с грузом непосредственно над жесткой опорой имеет место незначительное деформирование до 8 мм верхней части жесткой опоры. При этом наблюдается деформирование гибкой опоры. Максимальное перемещение средней части опоры в южном направлении составляет 17 мм. Расположение тележки с грузом посередине пролета приводит к наиболее значительному деформированию обеих опор: жесткая опора в месте сопряжения с пролетным строением имеет перемещение в южном направлении 14 мм, гибкая опора имеет перемещение средней части в южном направлении 20 мм (рис. 2.20).

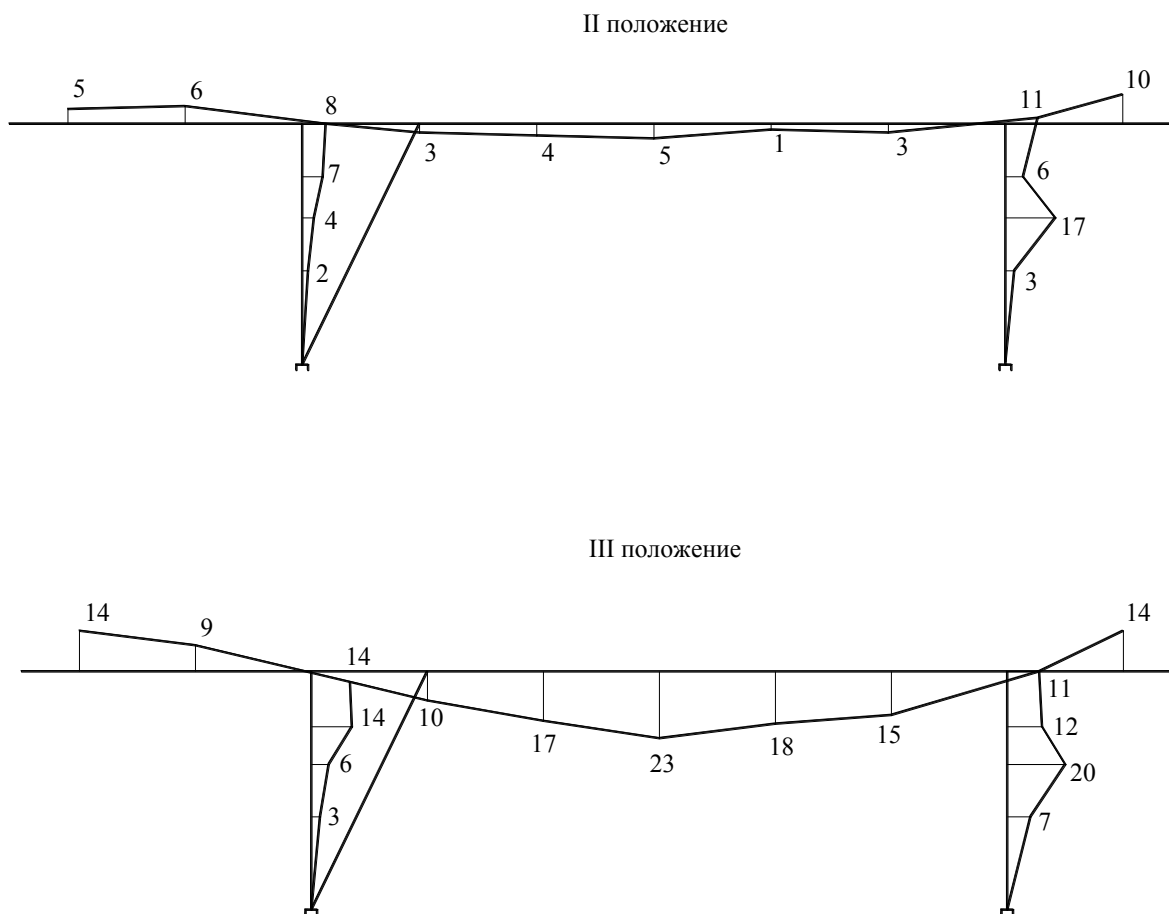


Рис. 2.20. Перемещение узлов (мм) опор мостового перегружателя Петропавловской ТЭЦ-2



**Мостовой перегружатель доменного цеха Орско-Халиловского металлургического комбината.**

*Деформативность консоли со стороны жесткой опоры:*

Максимальные прогибы консоли со стороны жесткой опоры наблюдаются при ее непосредственном нагружении тележкой с грузом (положение II): для южной балки прогиб составляет 36 мм, для северной – 40 мм (рис.2.21).

Перекос конца консоли составляет  $0,002\ell$ . Максимальные значения прогиба обратного направления (выгиба) конца консоли наблюдаются при загрузке пролетной части моста тележкой с грузом (положение III) и составляют 25 мм для южной балки и 26 мм для северной балки.

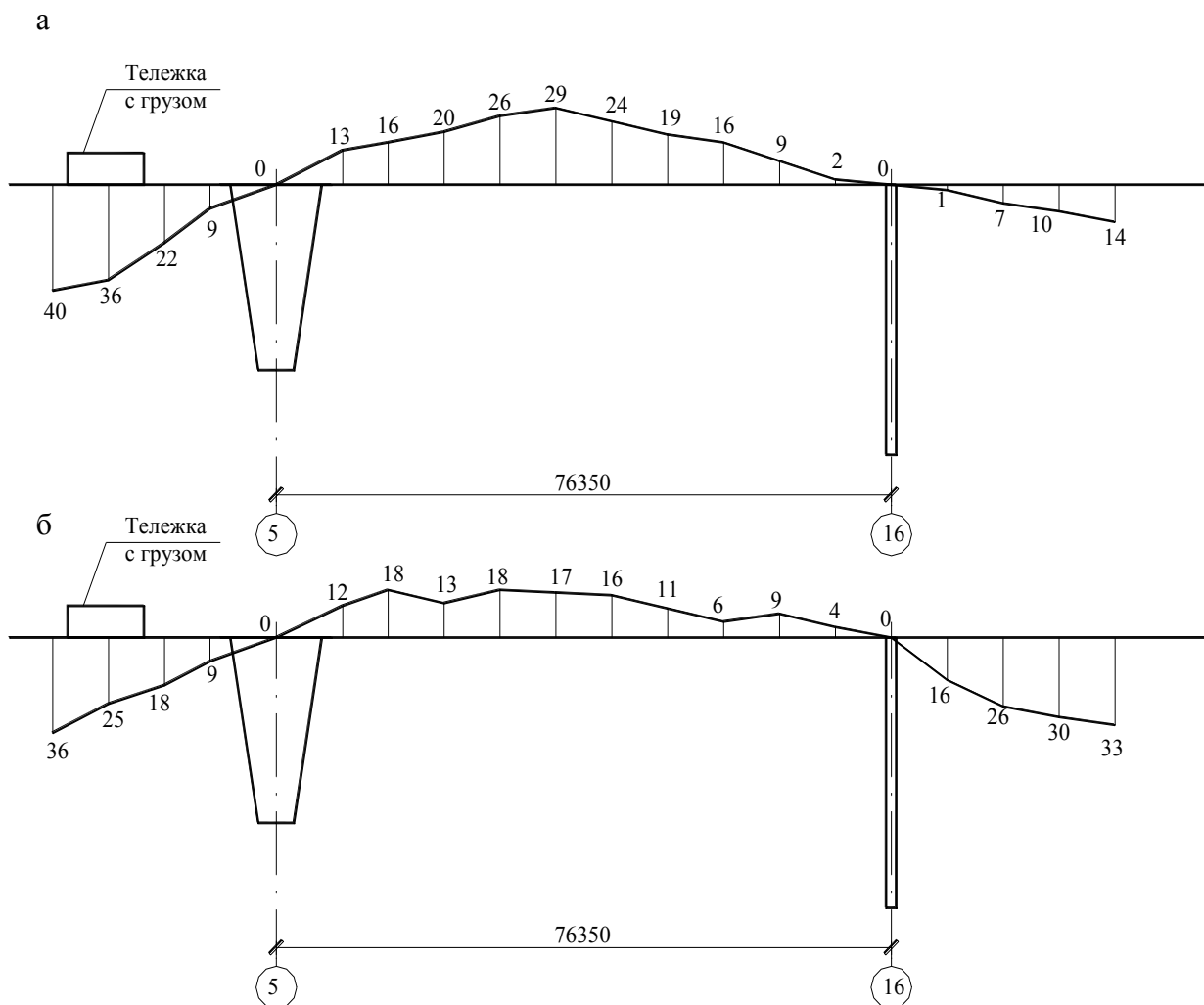


Рис. 2.21. Перемещение узлов (мм) северной (а) и южной (б) балок мостового перегружателя ОХМК при загрузке консоли со стороны жесткой опоры

*Деформативность ездовых балок в пролетной части моста мостового перегружателя:*

Максимальные прогибы пролетной части наблюдаются при непосредственном ее загрузке тележкой с грузом (положение III) и составляют для южной балки 35 мм, для северной – 28 мм (рис.2.22). Выгиб пролетной части наблюдается при загрузке консольного участка со стороны жесткой опоры и достигает 18 мм для южной балки и 29 мм – для северной.

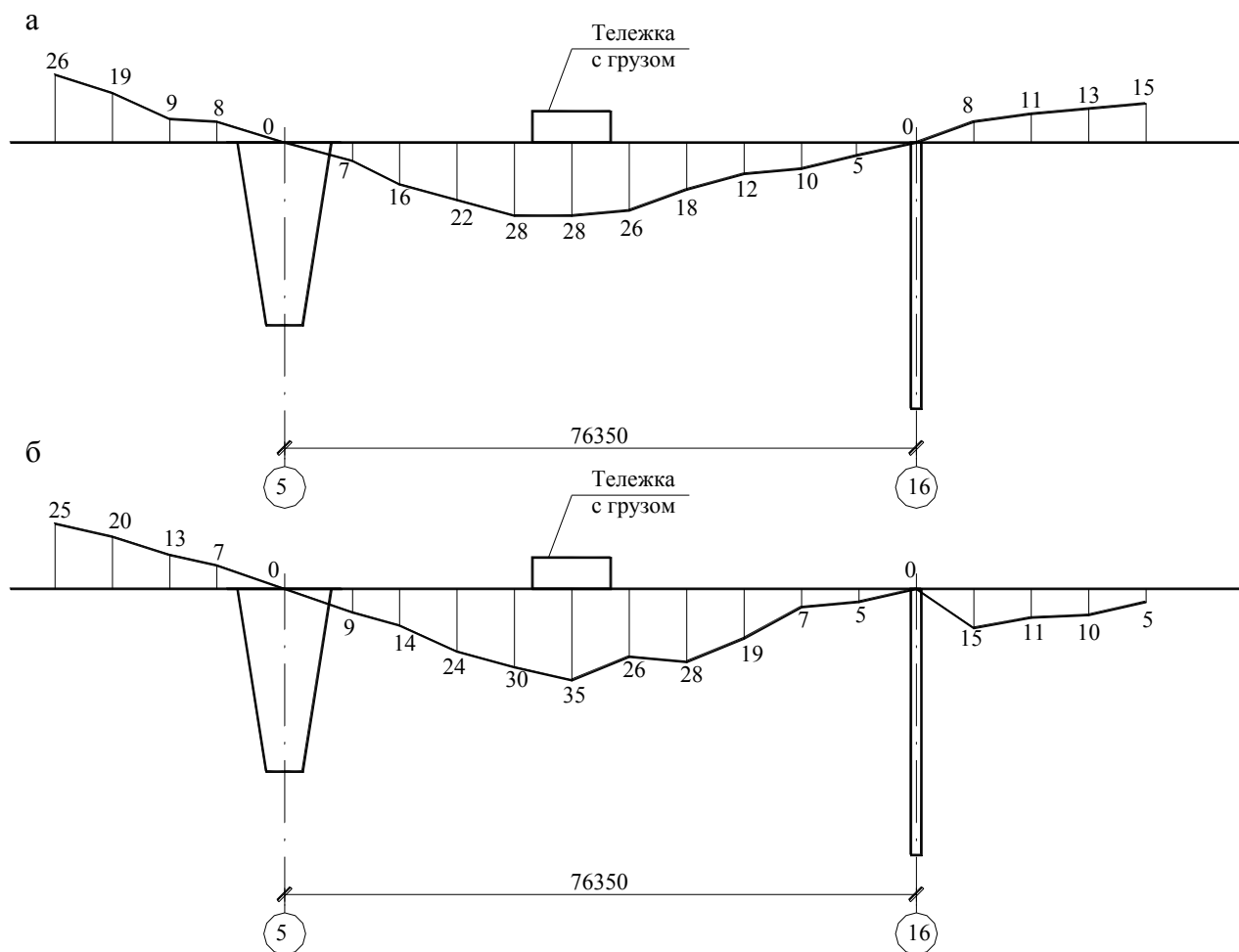


Рис. 2.22. Перемещение узлов (мм) северной (а) и южной (б) балок мостового перегружателя ОХМК при загрузке пролетной части моста

*Деформативность консоли со стороны гибкой опоры:*

В результате геодезической съемки установлено, что консоль южной балки имеет остаточный прогиб 20 мм. С учетом этого максимальные деформации концевой части консоли со стороны гибкой опоры для южной балки достигают 33 мм. Для северной балки соответствующий прогиб составляет 14 мм при загрузке консоли со стороны жесткой опоры (положение II), а выгиб – 15 мм при загрузке пролетной части моста (положение III).

*Деформативность гибкой опоры мостового перегружателя*

При расположении тележки без груза на консоли со стороны жесткой опоры имеет место отклонение от вертикали гибкой опоры в средней части 61 мм, в уровне нижнего пояса балки – 114 мм в восточном направлении.

Значения относительных прогибов приведены в табл.2.2. Видно, что относительные прогибы пролетных частей мостовых перегружателей значительно меньше предельных значений. Относительные прогибы концевых участков консольных частей мостовых перегружателей составляют 45-75% от предельных значений.

Как показывают длительные наблюдения, при незначительных повреждениях прогибы характерных точек довольно стабильны. По мере накопления усталостных трещин, а также по мере увеличения длины данных трещин деформативность конструкций возрастает. Следовательно, увеличение деформативности конструкций при отсутствии изменения режима эксплуатации свидетельствует о чрезмерном развитии повреждений и указывает на необходимость безотлагательного выполнения ремонтно-восстановительных работ.

Таблица 2.2

Максимальные значения относительных прогибов консолей и пролета мостовых перегружателей

Наименование предприятия, номер крана	Консоль со стороны жесткой опоры	Середина пролета	Консоль со стороны гибкой опоры
Петропавловская ТЭЦ-2, №1 *	1/435	1/2000	1/666
ОХМК, №1 *	1/625	1/2180	---
КХП ММК, №4	1/500	1/2000	1/400
КХП ММК, №1	1/400	1/2161	1/400

### 2.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЕЗДОВЫХ БАЛОК ПРИ ОСТАНОВКЕ МОСТОВОГО ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ

#### *Метод скоростной покадровой фоторегистрации.*

Выполнялись прямые измерения горизонтальных поперечных перемещений ездовых балок от инерционных воздействий при остановке мостового перегружателя №1 бис КХП ОАО «ММК» методом скоростной покадровой фоторегистрации при помощи цифровых фотоаппаратов и видеокамер.

На поверхность нижних поясов ездовых балок мостового перегружателя приклеивались координатные сетки, образуемые системой взаимно перпендикулярных линий, нанесенных с шагом 100 мм (рис. 2.23). Шаг сетки и способ ее нанесения зависят от задач исследования и условий испытания.

На земле вдоль моста перегружателя устанавливались три фотоаппарата на штативах и видеокамера (рис. 2.24). При проведении испытаний производилась скоростная покадровая съемка сетки в процессе инерционных воздействий (остановка перегружателя).

Испытания конструкций мостового перегружателя производились при установке грейферной тележки, в положениях I - V (рис. 2.25) и при рабочем состоянии мостового перегружателя - «Передвижение крана».

В первом (начальном) положении тележка с грузом находилась в самом крайнем положении на консоли со стороны гибкой опоры. Далее тележка с грузом устанавливалась во втором положении над гибкой опорой так, чтобы центр грейфера совпадал с осью опоры. Затем тележка с грузом перемещалась на середину пролета в третье положение. Далее тележка с грузом устанавливалась в четвертом положении над жесткой опорой и в самом крайнем положении на консоли со стороны жесткой опоры в пятое положение.

При каждом положении тележки мостового перегружателя пятикратно регистрировались перемещения.

При обработке фотографий с помощью масштабирования в программном комплексе «AutoCAD» измерялись параметры сетки или известные размеры конструкций крана до и после окончания колебаний, имеющих место после остановки мостового перегружателя. Перемещения вычисляли как разность расстояний между размерами положения сетки или конструкций до и после инерционных испытываемых ездовых балок.

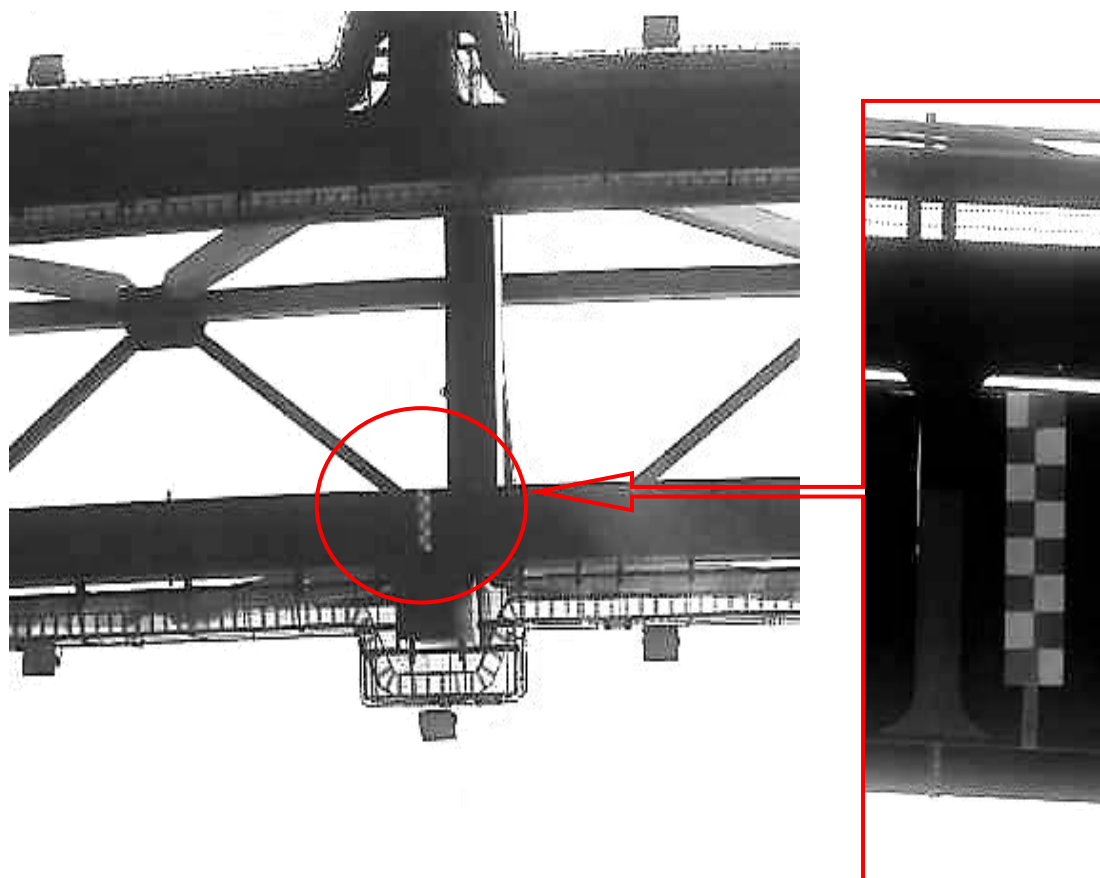


Рис. 2.23. Вид координатных сеток

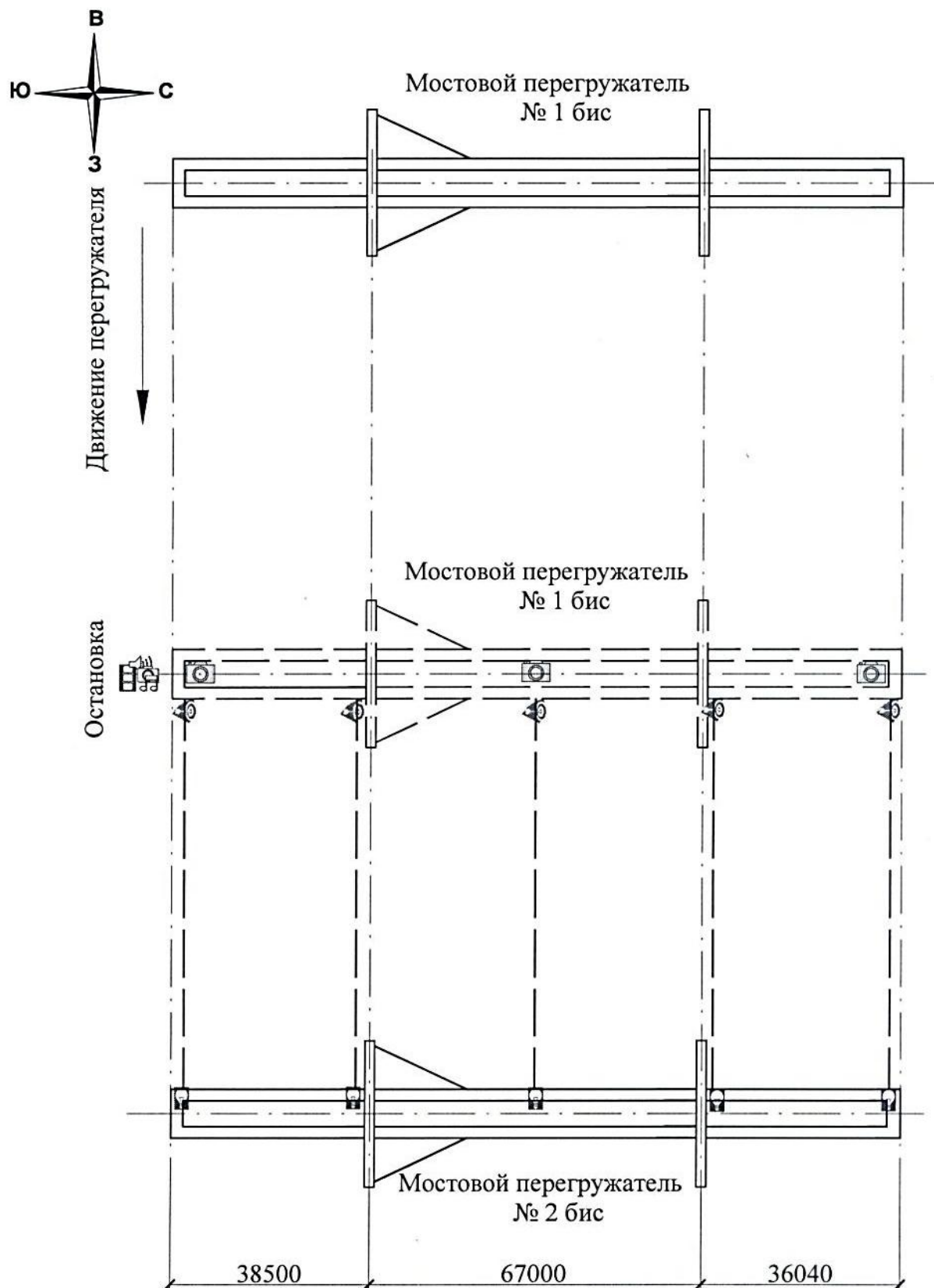






Рис. 2.24. Схема расположения измерительных приборов

-  – видеокамера,  – лазерный дальномер,
-  – фотоаппарат,  – мишень

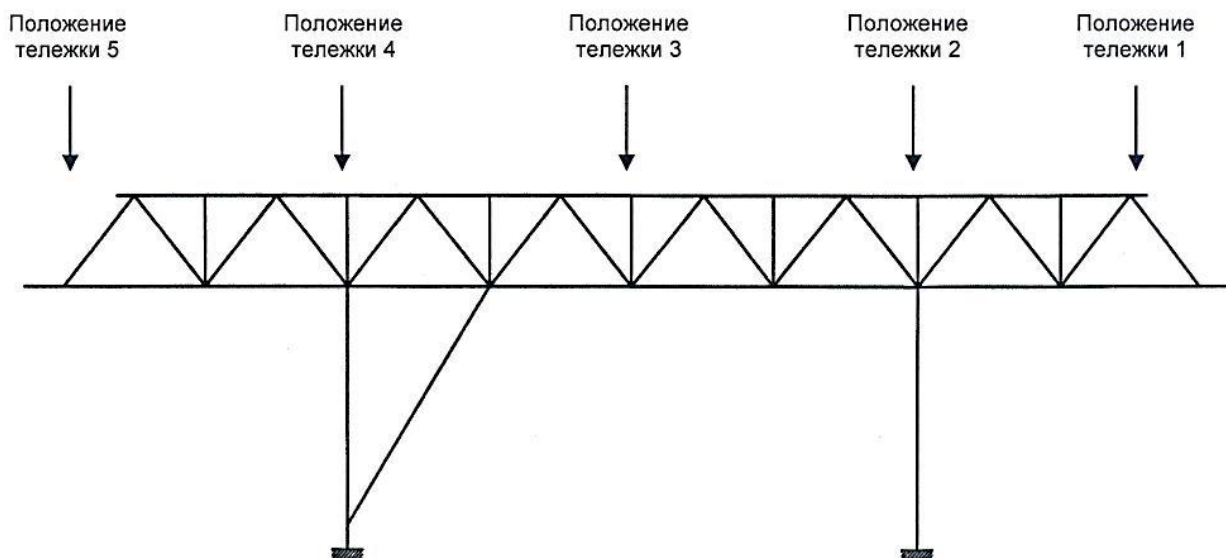


Рис. 2.25. Схема расположений грейферной тележки

Пятикратная регистрация замеров и статистическая обработка полученных данных позволила существенно уменьшить случайные погрешности.

Точность определения перемещений этим методом растет с увеличением базы измеряемого параметра и уровня измеряемых перемещений [66].

***Измерение амплитуд перемещений ездовых балок лазерными дальномерами.***

Для измерения амплитуд перемещений ездовых балок мостового перегружателя №1 бис КХП ОАО «ММК» в производственных условиях в настоящей работе были применены лазерные дальномеры «Hilti PD-32».

На проходной площадке мостового перегружателя №2 бис со стороны восточной ездовой балки были установлены и зафиксированы пять лазерных дальномеров. Луч лазера был направлен на мишень «Hilti POA 50» выполненной из твердой пластмассы со специальным отражающим покрытием прикрепленной к стенке западной ездовой балки мостового перегружателя №1 бис. При расстояниях свыше 10 м (30 футов) целесообразно применять мишень при неблагоприятных условиях освещения. Схема размещения лазерных дальномеров показана на рис. 2.24.

При проведении испытаний производились замеры амплитуд перемещений ездовых балок на каждой ступени нагружения и в процессе динамического воздействия. Положение грейферной тележки и рабочие состояния мостового перегружателя см. рис. 2.25.

При проведении замеров использовалась функция «Min/Max». Измерение минимального и максимального расстояний (Min/Max). Обе функции запускаются одновременно с помощью клавиши «Min/Max». Определение максимального (минимального) расстояния выполняется в режиме непрерывного измерения. Результат выводится на дисплей только тогда, когда происходит увеличение (уменьшение) измеряемого расстояния.

Последовательность выполнения измерений:

- при запуске функции «Min/Max» включается лазерный луч;
- направление дальномера на целевую точку (мишень);

- нажатие клавиши измерения;
- запуск режима непрерывного измерения;
- остановка измерений нажатием на соответствующую клавишу;
- проведение контрольного измерения расстояния после затухания колебаний мостового перегружателя.

***Измерение частотных характеристик ездовых балок мостовым портативным вибронализатором.***

Для измерения частотных характеристик ездовых балок мостового перегружателя №1 бис КХП ОАО «ММК» в производственных условиях был применен портативный вибронализатор «Вибран-3».

К стенке в уровне верхнего пояса ездовой балки прикреплялись 4 вибродатчика с магнитным основанием. Схема размещения вибродатчиков показана на рис. 2.26.



Рис. 2.26. Схема расположения вибродатчиков

При проведении испытаний производились замеры вибросигналов на каждой ступени нагружения и в процессе инерционных воздействий. Вибродатчики воспринимают механические колебания объекта контроля, преобразовывают их в электрический сигнал и передают его в электронный блок. Электронный блок производит запись и последующую обработку полученных сигналов. Прибор имеет разъем USB-интерфейса связи с компьютером для передачи и обработки результатов.

Для замера прямых перемещений узлов ездовых балок крана- перегружателя №1 бис КХП ОАО «ММК» в производственных условиях использовались цифровые фотоаппараты

Многokратная регистрация размеров каждой сетки и статистическая обработка полученных данных позволяют существенно уменьшить случайные погрешности.

В нашем случае для получения достоверных данных условия окружающей среды должны отвечать следующему: скорость ветра не более 3 м/с, направление ветра не должно оказывать прямого фронтального действия на перегружатель (направление по диагонали или с торца), солнце не должно находиться в зените.

С учетом вышеизложенного в настоящей работе точность получения результатов путем скоростной покадровой фоторегистрации составляет  $\pm 5$  мм, что удовлетворяет частоте эксперимента и получению достоверных данных о перемещениях ездовых балок мостовых перегружателей.

*Лазерный дальномер.* Для измерения амплитуд перемещений ездовых балок мостового перегружателя №1 бис КХП ОАО «ММК» использовались лазерные дальномеры «Hilti PD-32», Германия

Основными параметрами лазерных дальномеров, рекомендуемых, для измерения амплитуд перемещений узлов ездовых балок кранов-перегружателей, являются:

- диапазон измеряемых перемещений от 1 до 200°мм;
- основная погрешность измерения не более  $\pm 1,5$  мм;
- рабочая температура от минус 10 до плюс 50°С;
- рабочий режим - непрерывное измерение;
- функция измерений «Min/Max».

*Точность и достоверность полученных результатов*

Прибор испускает волны по направлению видимого лазерного луча. При отражении этих волн от препятствия происходит сдвиг их фазы, который регистрируется прибором (рис. 2.27). Расстояние измеряется по величине сдвига фазы.

Этот принцип измерения позволяет проводить очень точные и надежные измерения расстояний до объектов без использования специальных отражателей.

Погрешность прибора составляет  $\pm 1,5$  мм для единичных и непрерывных измерений. На точность измерений оказывают влияние атмосферные воздействия. При измерении больших расстояний и при ощутимых атмосферных воздействиях точность измерений может составлять  $\pm (1,5 \text{ мм} + 20 \text{ промилле})$ .

*Портативный виброанализатор.* Для измерения частотных характеристик ездовых балок мостового перегружателя №1 бис КХП ОАО «ММК» в производственных условиях использовался портативный виброанализатор «Вибран-3» НПП «Интерприбор» Россия.

Основными параметрами портативных виброанализаторов, рекомендуемых, для измерения частотных характеристик ездовых балок мостовых перегружателей, являются:

- диапазон измеряемых виброскоростей от 0,1...500 мм/с;
- основная погрешность измерения не более  $\pm 5\%$ ;
- рабочая температура от -10 до +45°С;
- длительность записи процесса не менее 20 С;
- диапазон частот 0,5...100 Гц.

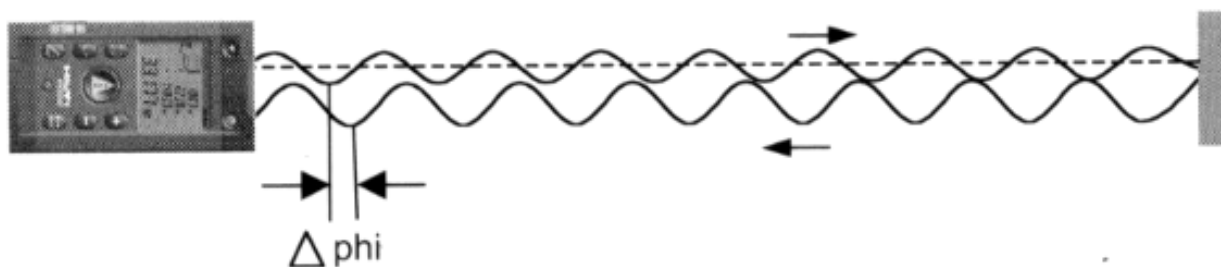


Рис. 2.27. Принцип измерения расстояний лазерным дальномером «Hilti PD-32»



*Методика исключения ошибок и учета погрешностей.* Как известно в инженерных и технологических науках измерение и последующая статистическая обработка полученных данных – это основной способ получения информации. Измерение значения  $X_{изм}$  какой-то величины  $X$  всегда отличается от ее истинного значения  $X_{ист}$ . Ошибкой измерения является разность

$$\delta_x = X_{изм} - X_{ист}. \quad (2.18)$$

Результат эксперимента всегда содержит ошибку, поэтому при проведении экспериментальных исследований следует придерживаться двух правил [68, 69]:

- 1) численное значение, полученное из опыта величины, должно обязательно сопровождаться указанием величины возможной ошибки;
- 2) единичные измерения не допустимы. Всякое измерение должно сопровождаться многократным повторением.

В научных и технических измерениях всегда имеется разброс. Оценить ошибки количественно можно разными способами, например, указать верхний предел абсолютного значения возможной ошибки:

$$|\delta_x| = \Delta X, \quad (2.19)$$

где  $\Delta X$  - абсолютная погрешность измерения значения величины  $X$ .

$\delta_x$  - неизвестное отклонение измеренного значения от истинного.

Результат измерения указывается вместе с погрешностью:

$$X = X_{изм} \pm \Delta X. \quad (2.20)$$

Эту запись следует принимать как неравенство:

$$X_{изм} - \Delta X \leq X_{ист} \leq X_{изм} + \Delta X. \quad (2.21)$$

Наиболее часто при проведении экспериментальных исследований отсутствует информация о причинах разброса, поэтому за наиболее вероятные значения измеряемой величины принимают среднее арифметическое из измеряемых значений:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}. \quad (2.22)$$

В качестве оценки абсолютной погрешности отдельного измерения используют зависимость:

$$\Delta X_i = \bar{X} - X_i. \quad (2.23)$$

Из формулы (2.22) следует, что

$$\sum_{i=1}^n \Delta X_i = \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i) = 0. \quad (2.24)$$

На практике используют либо  $\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)$ , либо сумму квадратов отклонения. Такие оценки называют соответственно средней арифметической погрешностью (2.25) или средней квадратической погрешностью (2.26):

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta X_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|, \quad (2.25)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2. \quad (2.26)$$

Определим эмпирический стандарт

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}. \quad (2.27)$$

Найдем отношение значимости

$$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S}. \quad (2.28)$$

Далее рассмотрим условие, если  $t(X) < \frac{2}{3\sqrt{g}} = K$ , то сомнительное значение остается в выборке, где  $g$  – уровень значимости, обычно в расчетах принимается 0,1; 1,0; 5,0%.

*Результаты экспериментальных исследований перемещений ездовых балок при оставке мостового перегружателя.* Результаты измерений горизонтальных поперечных перемещений ездовых балок методом скоростной покадровой фоторегистрации цифровыми фотоаппаратами и одновременно – лазерными дальномерами прямых перемещений показали, что результаты измерений коррелируются. По результатам статистической обработки получили средние значения поперечных перемещений в пределах от 30,0 до 150,0 мм, в зависимости от расположения тележки на мосту и контрольной точки наблюдения. Значения горизонтальных поперечных перемещений по результатам обработки данных представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения горизонтальных поперечных перемещений ездовых балок

Расположение грейферной тележки	Перемещения, мм		
	Консоль со стороны жесткой опоры	Середина пролета	Консоль со стороны гибкой опоры
На консоли со стороны гибкой опоры	45	35	115
На гибкой опоре	50	40	80
На середине пролета	60	50	60
На жесткой опоре	90	35	50
На консоли со стороны жесткой опоры	150	30	45

На рис. 2.28 и 2.29 представлены графики натуральных перемещений и прогибов ездовых балок мостового перегружателя №1 бис УПЦ КХП ОАО «ММК».

Результаты измерений портативным виброанализатором параметров колебаний ездовых балок показали следующее:

- велосиграмма типа затухающей синусоиды;
- частота затухающих колебаний 0,4 - 0,80 Гц;
- период колебаний  $T=1,3-2,6$  с;
- продолжительность колебаний – более 20 с.

На рис. 2.30 представлены велосиграммы параметров колебаний скорости ездовой балки замеренных на консоли со стороны жесткой опоры при пяти положениях грейферной тележки.

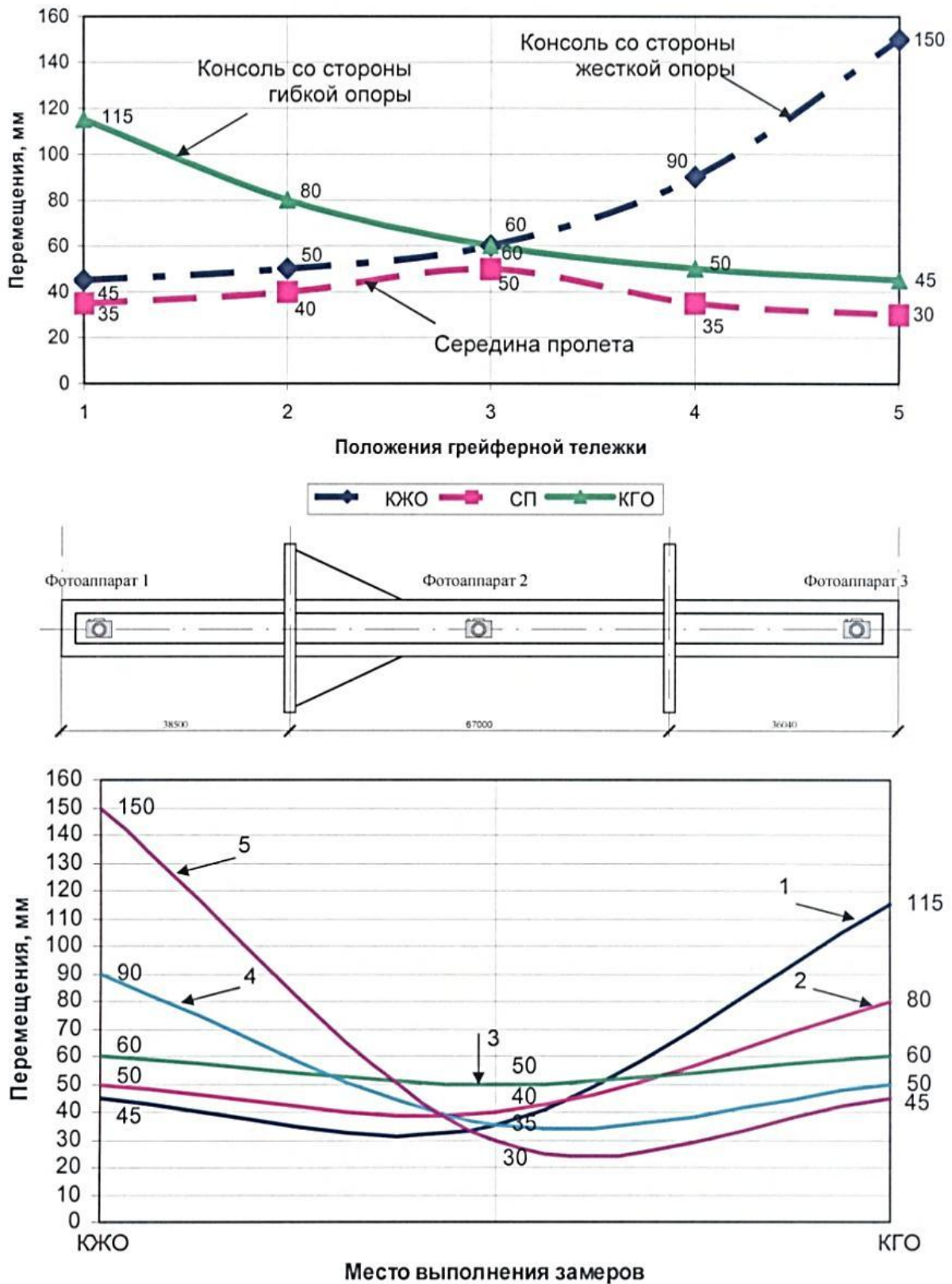


Рис. 2.28. Графики перемещения ездовых балок мостового перегружателя:  
место выполнения замеров: **КЖО** – консоль жесткой опоры;  
**СП** – середина пролета; **КГО** – консоль гибкой опоры;  
положение грейферной тележки: **1** – консоль гибкой опоры; **2** – гибкая опора;  
**3** – середина пролета; **4** – жесткая опора; **5** – консоль жесткой опоры

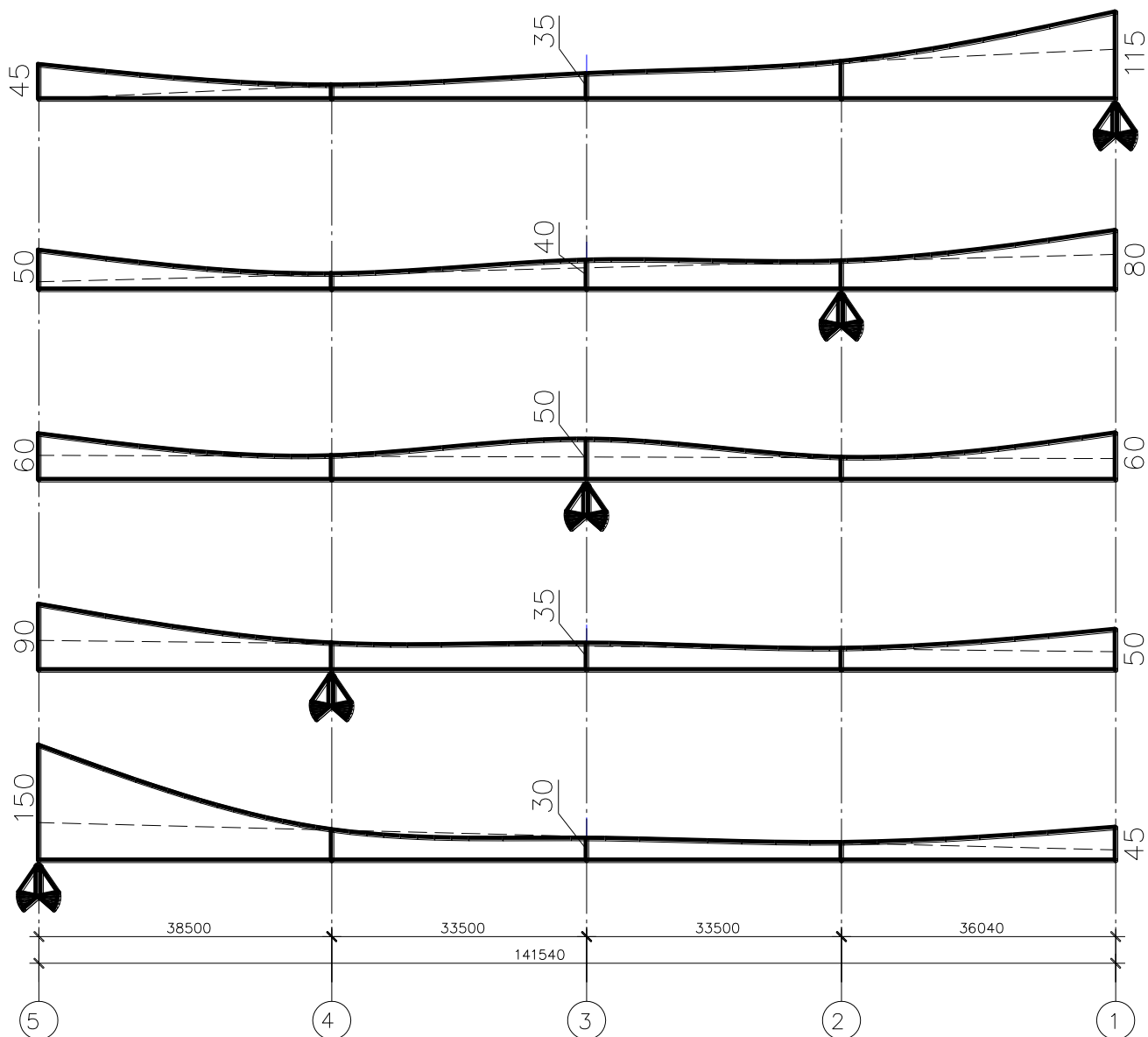


Рис. 2.29. Схемы горизонтальных поперечных перемещений западной ездовой балки мостового перегружателя №1 бис УПЦ КХП ОАО «ММК»

На основании анализа данных покадровой фоторегистрации и виброанализатора выявлены параметры затухающих колебаний при остановке перегружателя:

- частота затухающих колебаний составляет 0,4-0,8 Гц;
- время затухания значимых колебаний составляет 20 с, за которые ездовые балки совершают 15 полных колебаний с переменными значениями амплитуд (рис. 2.31);
- колебательный процесс после полной остановки дает дополнительные циклы нагружения ездовых балок с характерным базовым числом  $1,6 \times 10^6$  за 25 лет эксплуатации, которые ранее не учитывались при оценке остаточного ресурса конструкции.

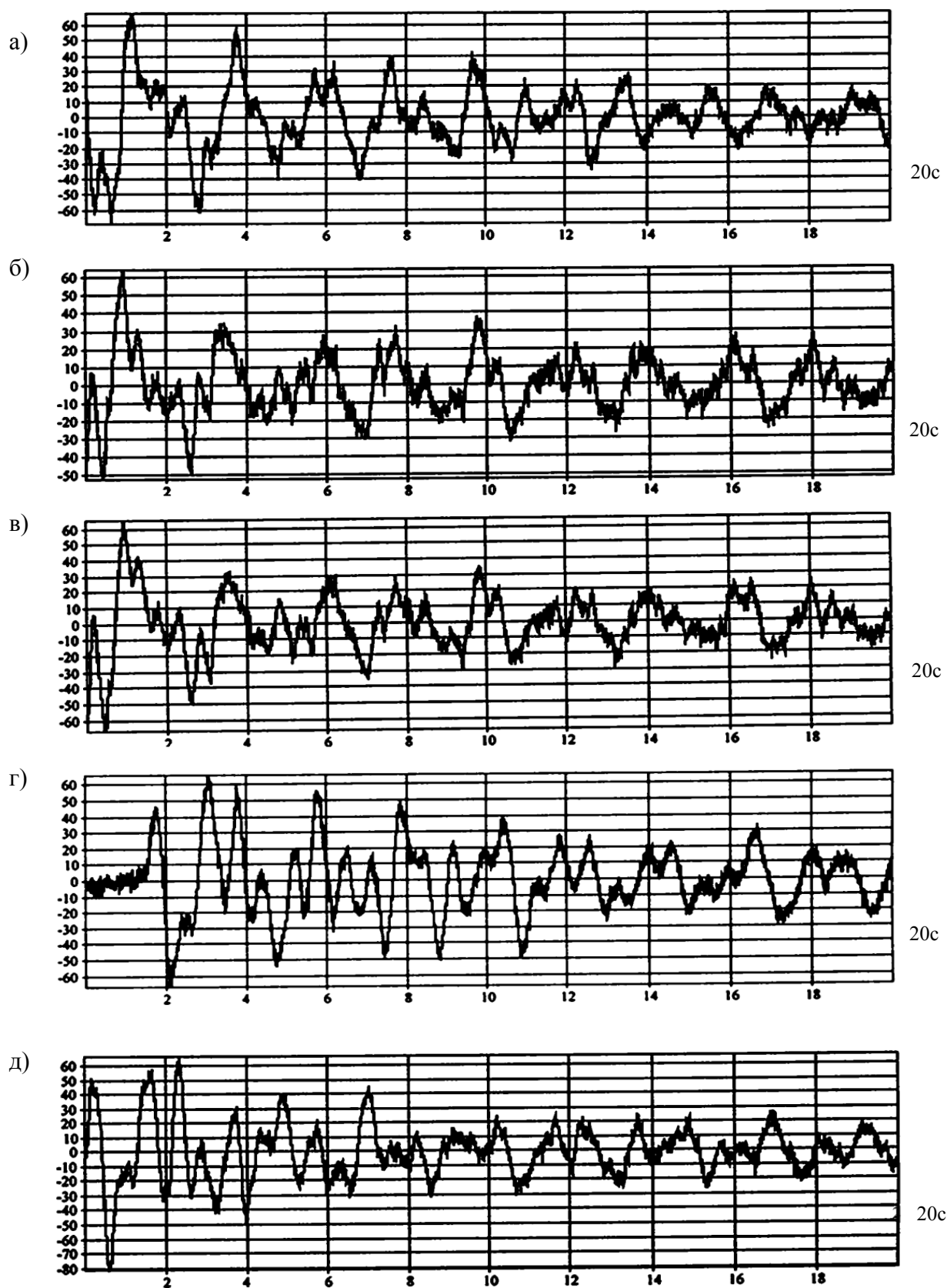


Рис. 2.30. Велосигramмы параметров колебаний скорости ездовой балки при различных положениях тележки:  
а – консоль гибкой опоры; б – гибкая опора; в – середина пролета; г – жесткая опора; д – консоль жесткой опоры

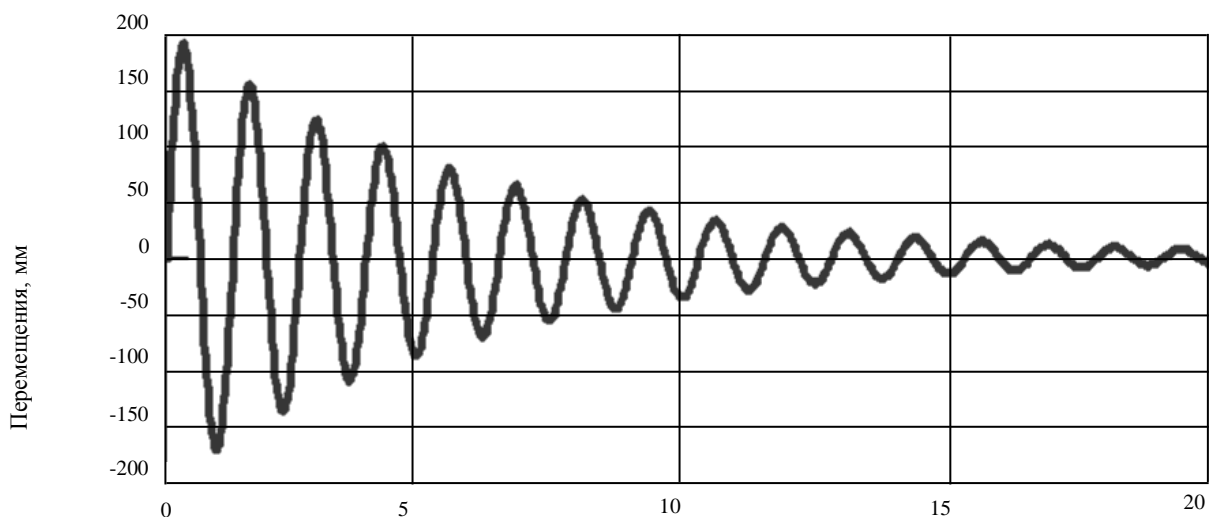


Рис. 2.31. График затухающего колебательного процесса на базе выделенного периода значимых колебаний ездовых балок

В процессе анализа полученных перемещений и характера колебательного процесса установлены места наилучшего расположения грейферной тележки при передвижении перегружателя.

Построение дополнительных блоков нагружения для учета циклического воздействия инерционных воздействий при остановке перегружателя выполнено по результатам оценки значений затухающих колебаний и на основании фактического режима работы. В дальнейшем инерционный блок нагружения учтен при построении алгоритма оценки остаточного ресурса ездовых балок.

## 2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС МАТЕРИАЛА УЗЛОВ ЕЗДОВЫХ БАЛОК МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

Для поставленной задачи моделирование производилось с помощью программного комплекса ProFEt&STARK\_ES, разработанной компанией «EuroSoft» (ООО «Еврософт»), Москва [71].

В расчете учтены следующие нагрузки:

### *Постоянные нагрузки*

Сбор и приложение постоянной нагрузки произведен в соответствии со СНиП «Нагрузки и воздействия» по нормативным методикам [72, 73].

При расчете, в качестве постоянных нагрузок, принимаем: собственный вес металлоконструкций крана, вес приемного бункера и грейферной тележки с грейфером (несмотря на то, что ранее мы их классифицировали как временную длительную нагрузку), нагрузку от механического и электрического оборудования.

### *Инерционные нагрузки*

Инерционные нагрузки вызывают дополнительные напряжения. Инерционные нагрузки в перегружателях возникают при неустановившихся движениях механизмов, при толчках, вызванных неровностями пути во время передвижения тележки или перегружателя, при ударах тележки о буфера.

При расчете, в качестве инерционных нагрузок [1, 6], принимаем:

- горизонтальные инерционные продольные нагрузки  $T$ , возникающие при разгоне или торможении грейферной тележки, равные 1/10 от суммы давлений всех колес тележки; эти силы направлены вдоль подтележечных рельс;
- горизонтальные инерционные поперечные нагрузки  $H$ , возникающие при передвижении грейферной тележки, равные 1/10 от давления на коло; эти силы направлены поперек подтележечных рельс;
- горизонтальные инерционные нагрузки, возникающие при разгоне и торможении мостового перегружателя, определяются по формулам:

$$H_i = \frac{G_i \cdot V_{кр}}{g \cdot t}; \quad H_i = \frac{(G_T \cdot Q) \cdot V_{кр}}{g \cdot t}, \quad (2.29)$$

где  $G_i$  – веса элементов стальных конструкций и оборудования;  
 $G_T$  – вес тележки;  
 $Q$  – вес груза;  
 $V_{кр}$  – скорость передвижения перегружателя;  
 $t$  – время разгона-торможения перегружателя;  
 $g$  – ускорение свободного падения.

Инерционные нагрузки элементов стальных конструкций и оборудования приложены в центре тяжести соответствующих элементов. Инерционные нагрузки грейферной тележки и груза (грейфера) приложены в месте контакта ходовых колес тележки с рельсом.

#### *Ветровые нагрузки*

Действие ветра на сооружение проявляется в виде нагрузки. Сила и характер ветра, преимущественное направление сильных ветров определяются местными климатическими условиями и рельефом местности [74, 75].

Ветровая нагрузка на сооружение зависит от скорости ветра и его порывистости, параметров конструкции, включая ее динамические характеристики, аэродинамических коэффициентов формы, размеров и положения конструкции относительно потока. Аэродинамические коэффициенты определяются либо опытным путем, либо регламентируется ГОСТ 1451-77. Значения его находятся в пределах 0,35-2,60 [76].

Согласно [77], для гибких сооружений, большепролетных сооружений открытого типа, характеризующихся значительно большим влиянием высших форм свободных колебаний, нельзя ограничиться учетом только основного тона.

Решетчатые конструкции, как объект действия на них ветровой нагрузки, характеризуются: размерами, удлинением, числом и взаимным расположением ферм, формой сечения и размерами стержней в одном узле, коэффициентом заполнения (сплошности) [77]:

$$\varphi = \frac{\sum S_j}{S}, \quad (2.30)$$

где  $S_j$  – наветренная площадь стержня и узловых соединений;  
 $S$  – площадь фермы по наружным обводам.

В исследованиях ветровой нагрузки на пространственные конструкции наибольшее внимание было уделено двум одинаковым плоским фермам, расположенным в параллельных плоскостях, преимущественно треугольного и квадратного сечения.

Интересно знание ветровой нагрузки на две плоские фермы при расстоянии между ними в долях высоты фермы. Существенное увеличение нагрузки на ферму заметно при углах атаки 10–20°. При расстоянии между фермами до 0,06 высоты, нагрузка на обе фермы становится меньше, чем на одну. Последний случай представляет, скорее, теоретический интерес, но вместе с тем указывает на малое влияние различных дополнительных элементов, установленных вблизи элементов фермы [77].

Анализ действия ветра на фермы при изменении углов атаки и скольжения позволяет сделать следующее заключение: наибольшая нагрузка на фермы будет при действии ветра, направленного под углом к горизонту  $\alpha=20^\circ$ , и при угле  $\beta=20^\circ$ . Она может стать на 40-50% больше нагрузки по нормали к плоской ферме [77].

Ветровая нагрузка на пространственные решетчатые конструкции исследована главным образом для четырехгранных и трехгранных башен и мачт с оттяжками, т.е. конструкции с большим удлинением. Балки жесткости висячих мостов, мосты перегружателей, эстакады имеют ту же особенность, что не позволяет вводить в расчеты понижающий коэффициент, зависящий от удлинения.

Расчет на ветровую нагрузку ведется в соответствии с ГОСТ 1451-77, который устанавливает нормы и метод расчета ветровой нагрузки, действующей на перегружатели в нерабочем и рабочем состояниях.

В соответствии с [76] ветровая нагрузка, действующая на мостовые перегружатели в нерабочем состоянии, является предельной, на которую должны быть рассчитаны элементы перегружателя: металлические конструкции, механизмы передвижения перегружателя и тележки, оси и валы ходовых колес, противоугольные устройства, а также определена собственная устойчивость перегружателя.

Ветровая нагрузка, действующая на мостовые перегружатели в рабочем состоянии, является предельной, при которой обеспечивается нормальная эксплуатация перегружателя с номинальным грузом, и должна учитываться при расчете металлических конструкций, механизмов, тормозов, при определении мощностей двигателей, собственной и грузовой устойчивости перегружателя.

Являющаяся переменной ветровая нагрузка определяется как сумма статической и динамической составляющих. При этом статическая составляющая, соответствующая установившейся скорости ветра, должна быть учтена во всех расчетах случаев, динамическая составляющая, являющаяся результатом пульсации скорости ветра, учитывается только при расчете на прочность металлических конструкций и при проверке устойчивости перегружателя.

Согласно [1, 78] при определении ветровой нагрузки перегружатель разбивается на отдельные конструктивные элементы, например, пролетное строение, опоры крана, механизм передвижения т.п. Статическая составляющая ветровой нагрузки на элемент перегружателя определяется по формуле:

$$F_i = p \cdot A_i, \quad (2.31)$$

где  $p$  – распределенная ветровая нагрузка на единицу расчетной площади элемента конструкции или груза в данной зоне высоты, определенная по формуле (3.4);

$A_i$  – расчетная площадь элемента или груза.



Распределенная ветровая нагрузка равна

$$p = q \cdot k \cdot c \cdot n, \quad (2.32)$$

где  $q$  – динамическое давление ветра;  
 $k$  – коэффициент, учитывающий изменение динамического давления по высоте;  
 $c$  – коэффициент аэродинамической силы;  
 $n$  – коэффициент перегрузки;

Динамическое давление ветра  $q$  связано с плотностью воздуха  $\rho$  и его скоростью  $V$  формулой

$$q = \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (2.33)$$

где  $\rho = 12,25 \text{ н/м}^3$ ;  
 $V$  – скорость ветра, направленная параллельно поверхности земли, м/с.

Расчетными скоростями ветра называют скорость ветра редкой повторяемости, возможные один раз в заданное число лет. Они предназначены для определения ветровой нагрузки на сооружение при его проектировании, строительстве и эксплуатации. Однако для последней характеристики (эксплуатации) данная интерпретация ветрового воздействия не отражает действительного положения вещей в природе. Тем более что данный подход не учитывает дифференцированность ветрового потока во времени, но и по направлениям, что естественно является важными характеристиками при расчете долговечности и усталости для пространственных сооружений.

Сочетание нагрузок для расчета мостового перегружателя принимались по табл. 2.4 [1].

Проверку прочности в общем случае следует проводить с учетом всех компонентов напряженного состояния [36]:

$$\sigma = \pm \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{I_x} \cdot y \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot x \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (2.34)$$

где  $N$  – продольное усилие в поясе;  
 $M_x$  – момент от вертикальной нагрузки;  
 $M_y$  – момент от горизонтальных поперечных сил;  
 $A$  – площадь сечения;  
 $I_y, I_w$  – моменты инерции сечения;  
 $x, y$  – координаты рассматриваемой точки сечения относительно главных осей;  
 $\gamma_c$  – коэффициент условий работы конструкций;  
 $R_y$  – расчетное сопротивление стали по пределу текучести.

$$\tau = \pm \frac{Q_x \cdot S_x}{I_x \cdot t} \pm \frac{Q_y \cdot S_y}{I_y \cdot t} + \frac{M_{кр}}{2 \cdot b \cdot h \cdot t} \leq R_s \cdot \gamma_c, \quad (2.35)$$

где  $Q_x, Q_y$  – поперечные силы от вертикальных и горизонтальных нагрузок;  
 $M_{кр}$  – момент чистого кручения;  
 $S_x, S_y$  – статические моменты отсеченной части сечения;  
 $h, b$  – высота сечения и расстояние между осями стенок;  
 $t$  – толщина листа в точке проверки касательных напряжений;  
 $R_s$  – расчетное сопротивление стали по сдвигу.

Сочетание нагрузок в расчетных случаях для мостовых перегружателей

№ п/п	Наименование и обозначение нагрузки		Подъем груза и передвижение тележки				Передвижение крана				Нерабочее состояние	
			Основное сочетание		Особое сочетание		Основное сочетание		Особое сочетание		Основное сочетание	
			нагрузка	$k_c$	нагрузка	$k_c$	нагрузка	$k_c$	нагрузка	$k_c$	нагрузка	$k_c$
1	Вес стальных конструкций	$G_M$	$G_M$	1	$G_M$	1	$K_T G_M$	1	$G_M$	1	$G_M$	1
2	Вес перегрузочных устройств	$G_{II}$	$G_{II}$	1	$G_{II}$	1	$K_T G_{II}$	1	$G_{II}$	1	$G_{II}$	1
3	Вес механического и электрического оборудования	$G_o$	$G_o$	1	$G_o$	1	$K_T G_o$	1	$G_o$	1	$G_o$	1
4	Вес грейферной тележки	$G_T$	$\psi G_T$	1	$\psi G_T$	1	$K_T G_T$	1	$G_T$	1	$G_T$	1
5	Вес груза	$Q$	$\psi Q$	1	$\psi Q$	1	-	-	-	-	-	-
6	Горизонтальная инерционная продольная нагрузка при передвижении грейферной тележки с грузом	$T$	$T$	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Горизонтальная инерционная поперечная нагрузка при передвижении грейферной тележки с грузом	$H$	$H$	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Горизонтальная инерционная нагрузка при передвижении крана	$H_i$	-	-	-	-	$H_i$	0,9	-	-	-	-
9	Нагрузка при перекосе	$H_s$	$0,5H_s$	0,9	-	-	$H_s$	0,9	-	-	$H_s$	0,9
10	Ветровая нагрузка рабочего состояния	$W_{pc}$	$W_{pc}$	0,9	$W_{pc}$	0,8	$W_{pc}$	0,9	$W_{pc}$	0,8	-	-
11	Ветровая нагрузка нерабочего состояния	$W_{nc}$	-	-	-	-	-	-	-	-	$W_{nc}$	0,9
12	Нагрузка от обледенения конструкций	$G_{ch}$	$G_{ch}$	0,9	$G_{ch}$	0,8	$G_{ch}$	0,9	$G_{ch}$	0,8	$G_{ch}$	0,9
13	Нагрузка при перепаде температур	$P_t$	$P_t$	0,9	$P_t$	0,8	$P_t$	0,9	$P_t$	0,8	$P_t$	0,9
14	Горизонтальная продольная нагрузка при наезде грейферной тележки на упоры	$T_o$	-	-	$T_o$	0,8	-	-	-	-	-	-
15	Горизонтальная поперечная нагрузка при наезде крана на упоры	$H_o$	-	-	-	-	-	-	$H_o$	0,8	-	-
16	Нагрузка при аварийном перекосе крана	$H_{so}$	-	-	-	-	-	-	$H_{so}$	0,8	-	-
17	Временная нагрузка на обслуживающие площадки	$q$	$q$	1	-	-	$q$	1	-	-	-	-

Примечания: Нагрузки 7 и 8, 9 и 16 совместно не учитываются. Нагрузка 17 учитывается только при расчете площадок. Во всех сочетаниях разгружающее действие нагрузки 2 не учитывается, так как перегрузочные устройства могут быть сняты.  $k_c$  – коэффициент сочетания;  $k_T$  – коэффициент толчков;  $\psi$  – динамический коэффициент.

Проверка прочности сводится к проверке наибольших нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений и их совместного действия.

Переход от нормальных и касательных напряжений к эквивалентным в рамках плоско-напряженного состояния выполнен по формуле:

$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}, \quad (2.36)$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения;

$\tau$  – касательные напряжения.

В качестве объектов для проведения расчетов выбраны решетчатые мостовые перегружатели.

В качестве расчетной модели выбрана пространственная стержневая система: мостовой перегружатель общей длиной 141,54 м, в составе пролетная часть 67 м, консольные части 38,50 и 36,04 м соответственно. Модель выбрана на основании натуральных объектов, а именно мостовых перегружателей №1бис, №2бис УПЦ КХП ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (рис. 2.32).

Расчеты мостового перегружателя были произведены по бездефектной схеме, при этом учитывалось воздействие реальных уровней нагружения металлоконструкций, механические характеристики используемых сталей.

В результате статического расчета были получены усилия и деформации в элементах схемы от каждого нагружения.

Для сравнения расчетных значений горизонтальных поперечных перемещений с экспериментальными данными произведен расчет несущих конструкций мостового перегружателя на действие инерционных нагрузок, возникающих при торможении, с учетом фактических условий в момент проведения эксперимента. Расчет произведен для трех случаев торможения перегружателя: при тормозном моменте 250 Нм (время остановки 0,7 с) и 125 Нм (время остановки 1,5 с; 4,7 с).

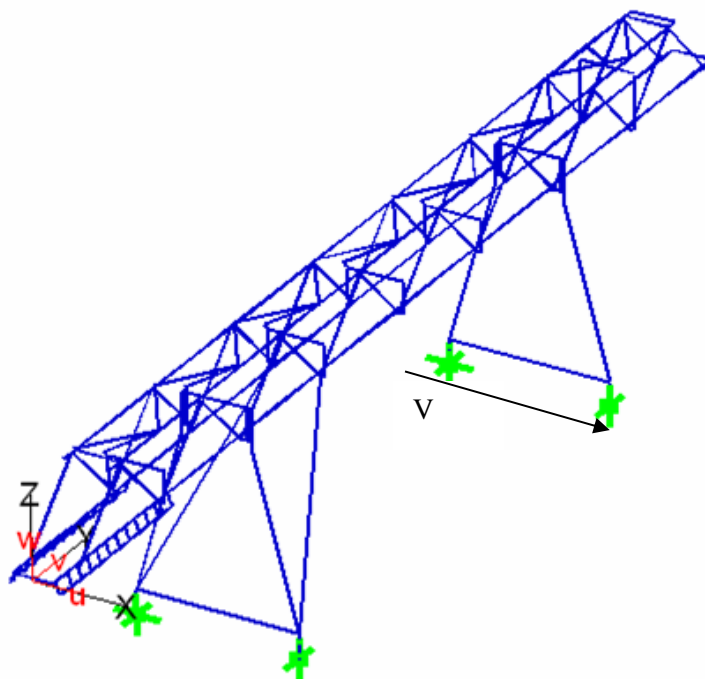


Рис. 2.32. Расчетная схема мостового перегружателя

Принципиальной определяющей нагрузкой в приведенных расчетах была инерционная нагрузка от участвующих в КЭ модели масс (металлоконструкции перегружателя, тележка с порожним грейфером, бункер).

При положении грейферной тележки на консоли со стороны гибкой опоры и на гибкой опоре максимальные поперечные перемещения в горизонтальной плоскости моста наблюдаются в ездových балках на консоли со стороны гибкой опоры (рис. 2.33, а).

При положении грейферной тележки в середине пролета, на жесткой опоре и на консоли со стороны жесткой опоры максимальные поперечные перемещения в горизонтальной плоскости моста наблюдаются в ездových балках на консоли со стороны жесткой опоры (рис. 2.33,б).

Значения поперечных перемещений ездových балок мостового перегружателя №1 бис представлены в табл. 2.5. Схема деформаций ездových балок при различных помещениях тележки представлены на рис. 2.34.

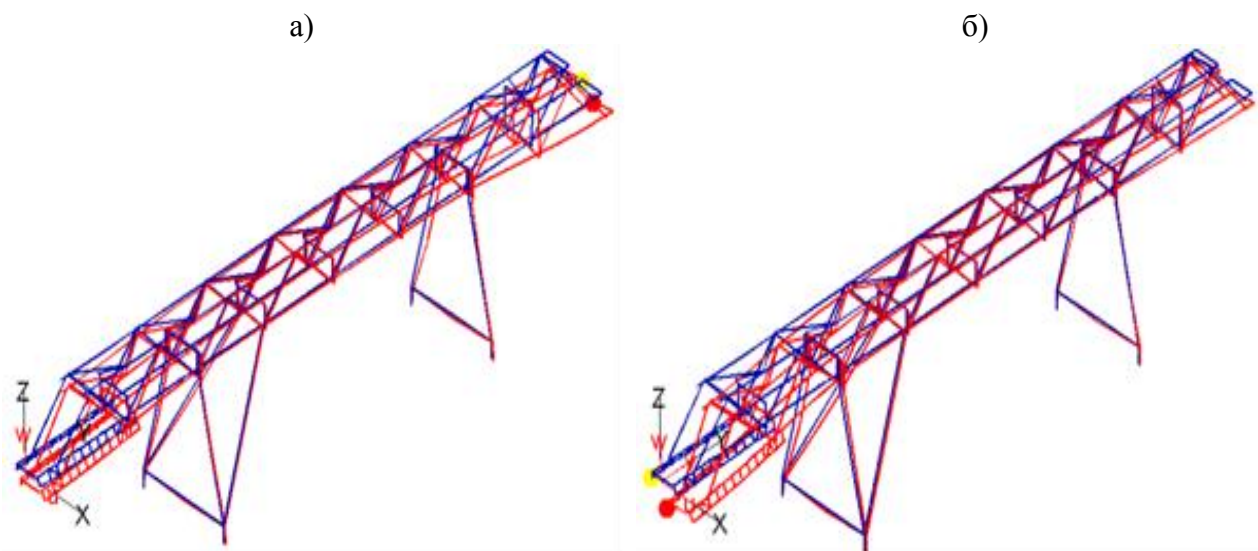


Рис. 2.33. Схемы деформации мостового перегружателя при положении й тележки на:  
 а – консоли со стороны гибкой опоры, гибкой опоре;  
 б – середине пролета, жесткой опоре, консоли со стороны жесткой опоры

Таблица 2.5

Значения горизонтальных поперечных перемещений ездových балок

Расположение грейферной тележки	Перемещения, мм		
	Консоль со стороны жесткой опоры	Середина пролета	Консоль со стороны гибкой опоры
На консоли со стороны гибкой опоры	40	31	124
На гибкой опоре	48	36	72
На середине пролета	54	48	56
На жесткой опоре	75	33	50
На консоли со стороны жесткой опоры	138	30	41

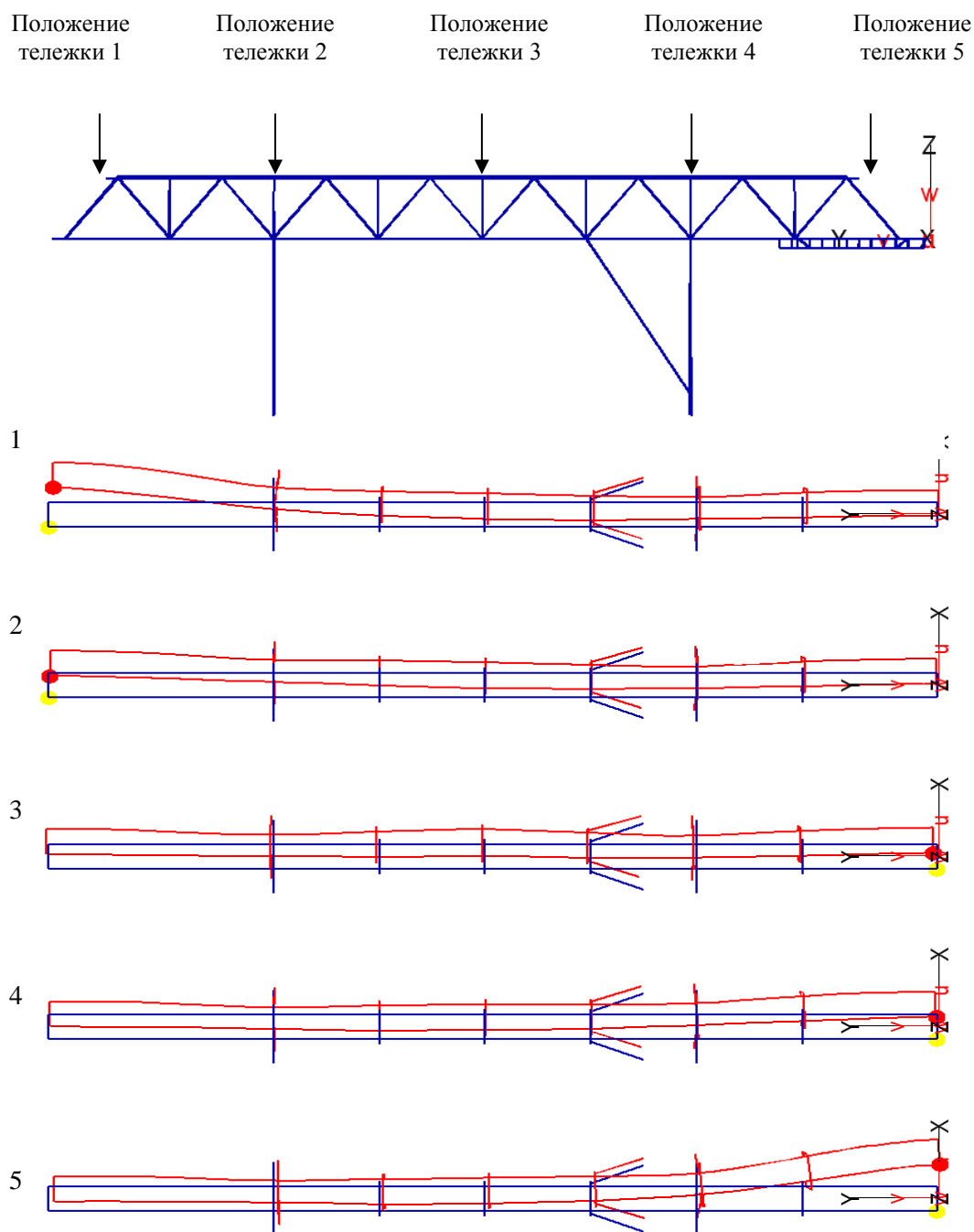


Рис. 2.34. Схемы деформации ездовых балок при различных положениях грейферной тележки

Основной вид работы мостового перегружателя характеризуется передвижением грейферной тележки по мосту, поэтому необходимо произвести оценку изменения напряжений от положения грейферной тележки.

По результатам статического расчета произведен расчет напряжений при разных положениях грейферной тележки с грузом и без него; при скоростях ветра в диапазоне от 3 до 27 м/с; различных инерционных нагрузках (в зависимости от времени торможения перегружателя) в двенадцати наиболее нагруженных сечениях ездовых балок (рис. 2.35, 2.36).

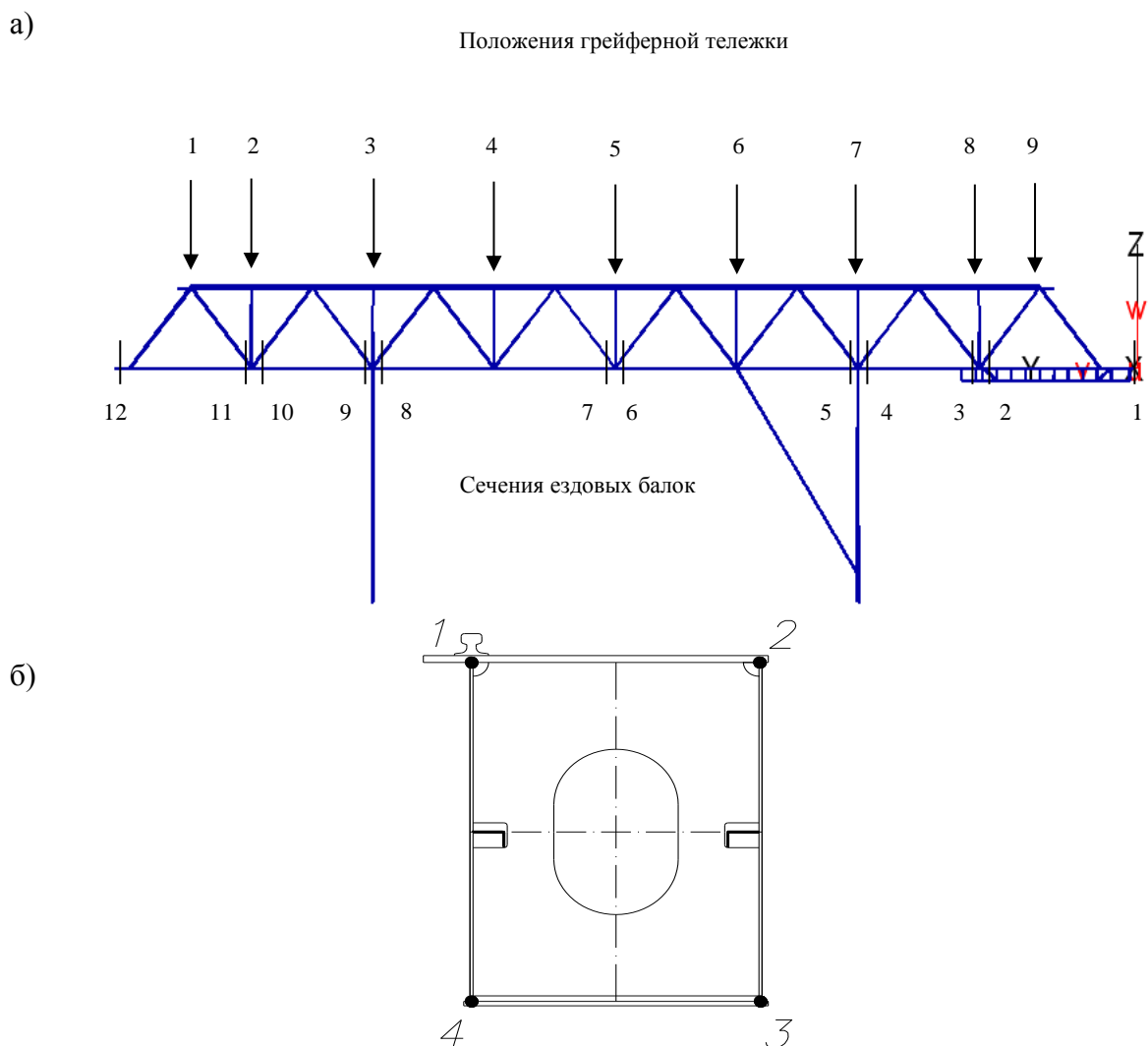


Рис. 2.35. Положения грейферной тележки на мосту и сечения ездовых балок (а); поперечное сечение ездовой балки с характерными зонами

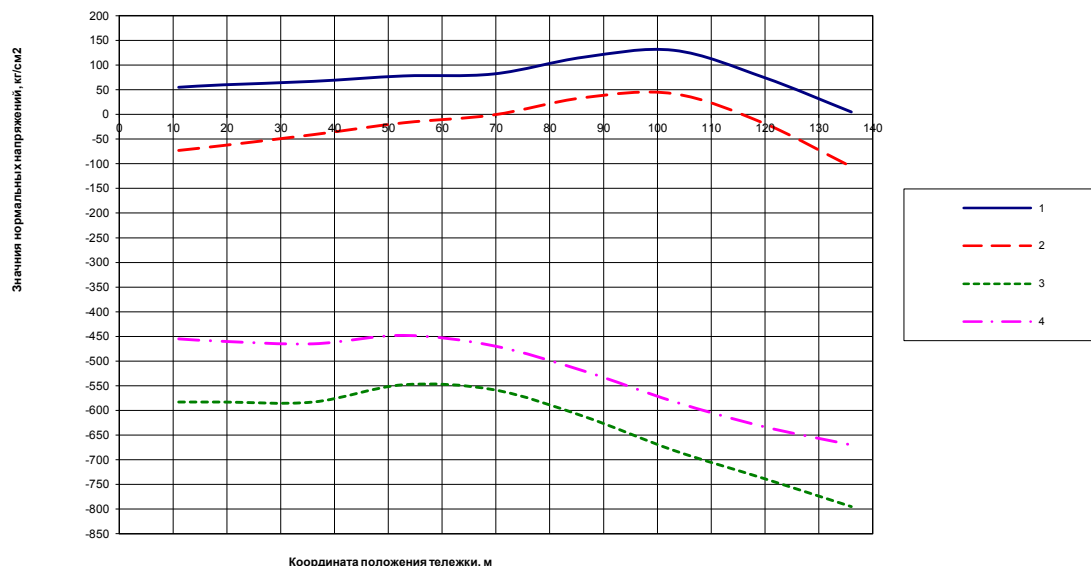
Проинтерполировав значения напряжений, были получены непрерывные графики изменения напряжений в характерных зонах сечения ездовой балки в зависимости от вида нагружения. Используя полученные массивы при расчете остаточного ресурса по принципу суперпозиций получим фактическое НДС в заданный момент времени соответствующий прогнозируемым нагружениям реального времени.

На основании графика затухающего колебательного процесса и пошагового статического расчета выполнили переход от перемещений к напряжениям в характерных зонах сечения ездовых балок (см. рис. 2.37 в качестве примера). На основании выборки экспериментальных данных по результатам покадровой фоторегистрации за 20 с, уравнения затухающих колебаний [79] и результатов расчета получена функция, характеризующая затухающие колебания консолей ездовых балок перегружателя, в которой коэффициенты уравнения получены эмпирическим путем:

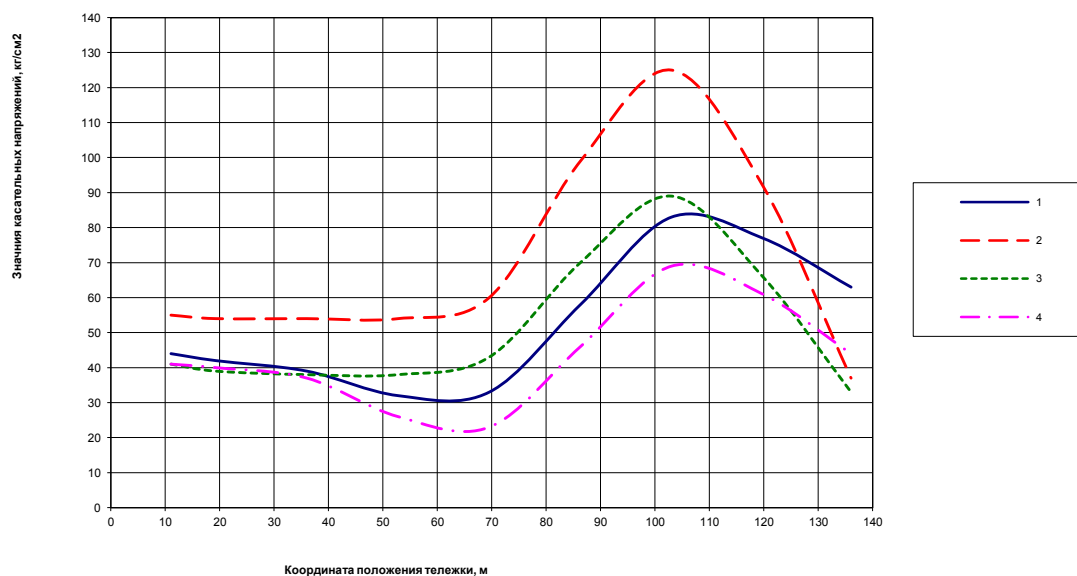
$$\Delta\sigma(t) = 2 \cdot \sigma_{A_0} \cdot e^{-h \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2.37)$$

где  $\sigma_{A_0}$  – амплитуда колебаний;  $h$  – коэффициент затухания колебаний;  $t$  – время затухания колебаний;  $\omega$  – частота колебаний.

а)



б)



в)

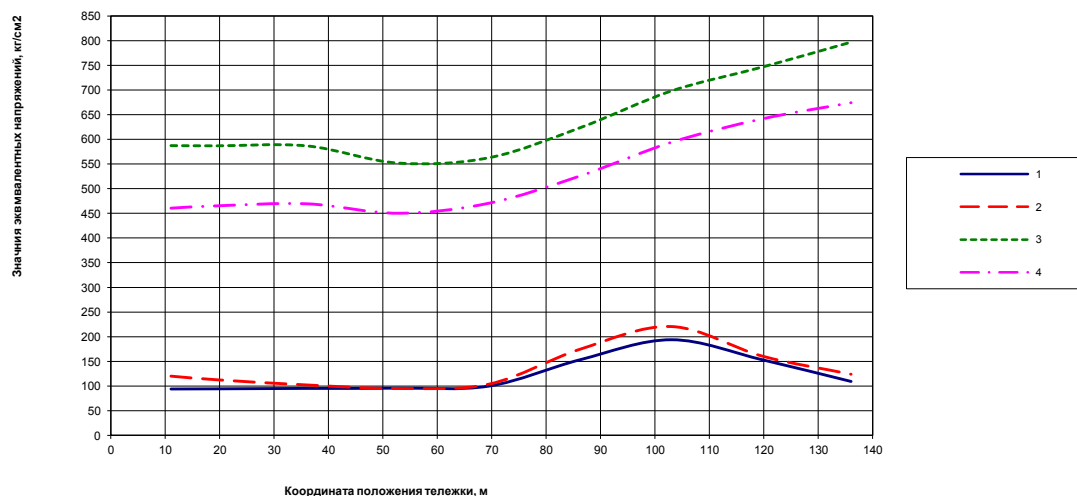


Рис. 2.36. Графики изменения напряжений в сечении ездовой балки в зависимости от положения грейферной тележки без груза:  
 а – нормальные напряжения; б – эквивалентные напряжения;  
 в – касательные напряжения

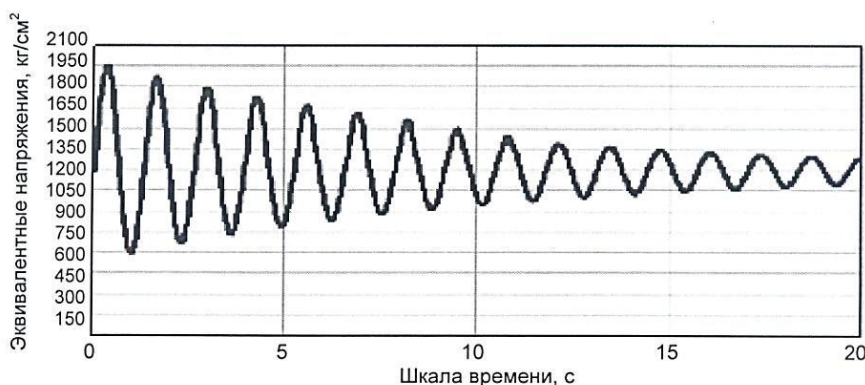


Рис. 2.37. График затухающего колебательного процесса изменения эквивалентных напряжений в характерной зоне сечения ездовой балки (консоль со стороны жесткой опоры, тележка на жесткой опоре)

Проведя расчеты по стержневой схеме без внимания остались места конструктивной концентрации напряжений и места воздействия локальных нагрузок. Для изучения закономерностей и характера перераспределения напряжений в указанных зонах было проведено моделирование работы узлов на пространственной схеме с конечными элементами типа «оболочка» (рис. 2.38, 2.39).

Для полноценного и адекватного расчета такой модели необходимо обладать данными об усилиях действующих на обрезах элементов (метод вырезания узлов классической теории равновесия). Но учитывая то, что модель узлового соединения построена конечными элементами типа оболочка, нагрузку следует задавать по эпюрам распределения напряжений в сечениях балки, т.е. через нормальные и касательные напряжения. Исходя из вышесказанного, нагружение на обрезах узла задавали по эпюрам распределения напряжений на основании результатов расчета по пространственной стержневой модели перегружателя. Согласно методу вырезания узлов (классический принцип строительной механики) - узел находится в равновесии. Закрепление узла производилось в трех направлениях по линиям пересекающим центр тяжести, для исключения влияний на общее состояние равновесия узла, при этом опорные реакции в точках закрепили близки нулевыми.

В местах конструктивной концентрации напряжений размер КЭ измельчался до 10 мм, основной размер элементов по всей модели составлял 30-50 мм. Модель узла содержит 23866 элементов и 23169 узлов.

Оценка НДС выполнена по критерию Мизеса [40, 80, 81]:

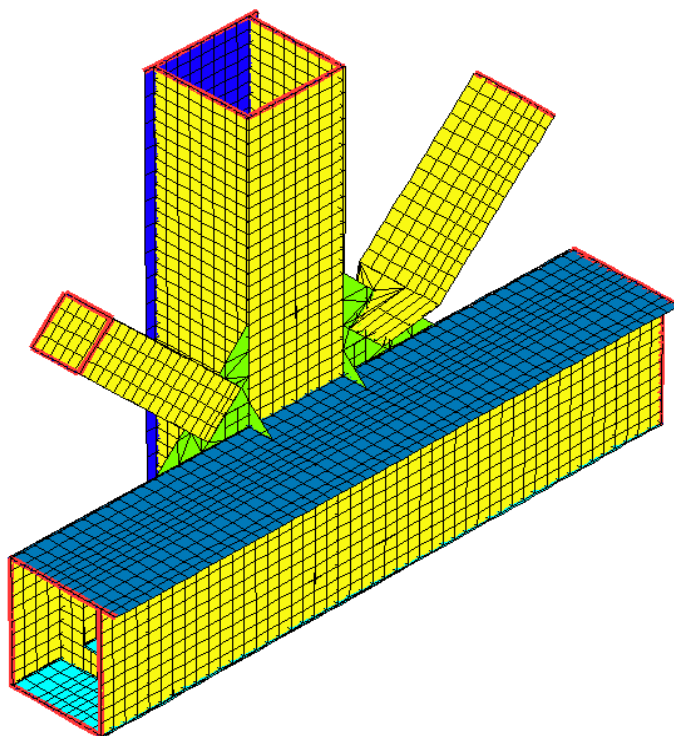
$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, \quad (2.38)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  – главные напряжения (нормальные напряжения на главной площадке).

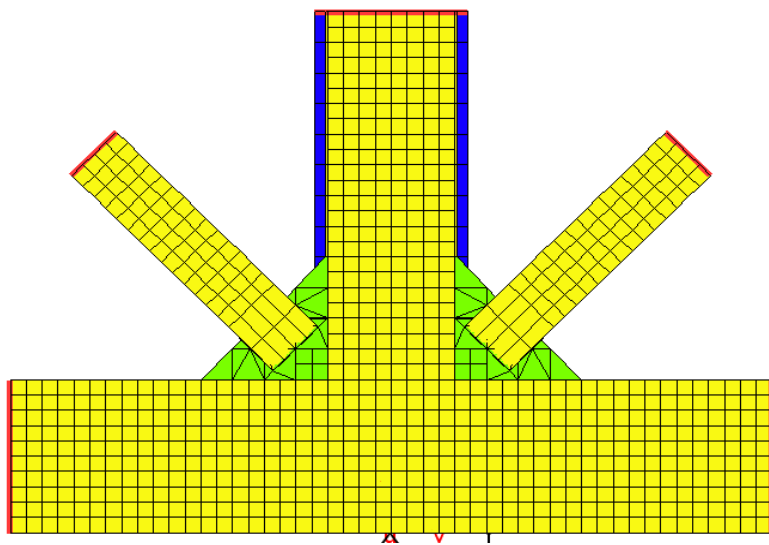
При этом, эквивалентное напряжение не зависит от ориентации площадки, на которой оно действует, то есть является инвариантным. Критерий Мизеса применим для изотропных материалов, имеющих вязкий характер разрушения.



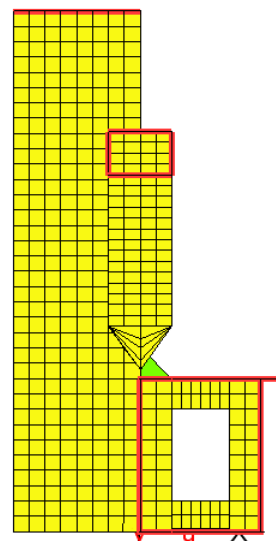
а)



б)



в)



г)

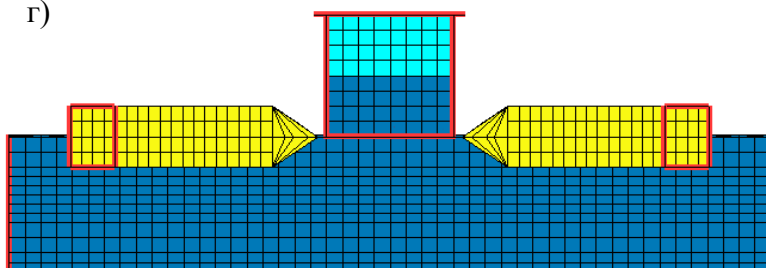


Рис. 2.38. Конечно-элементная модель узла (сопряжение ездовых балок, элементов решетки ферм и П-образных рам):  
а) аксонометрическая схема; б) фронтальный вид; в) вид сбоку; г) вид сверху

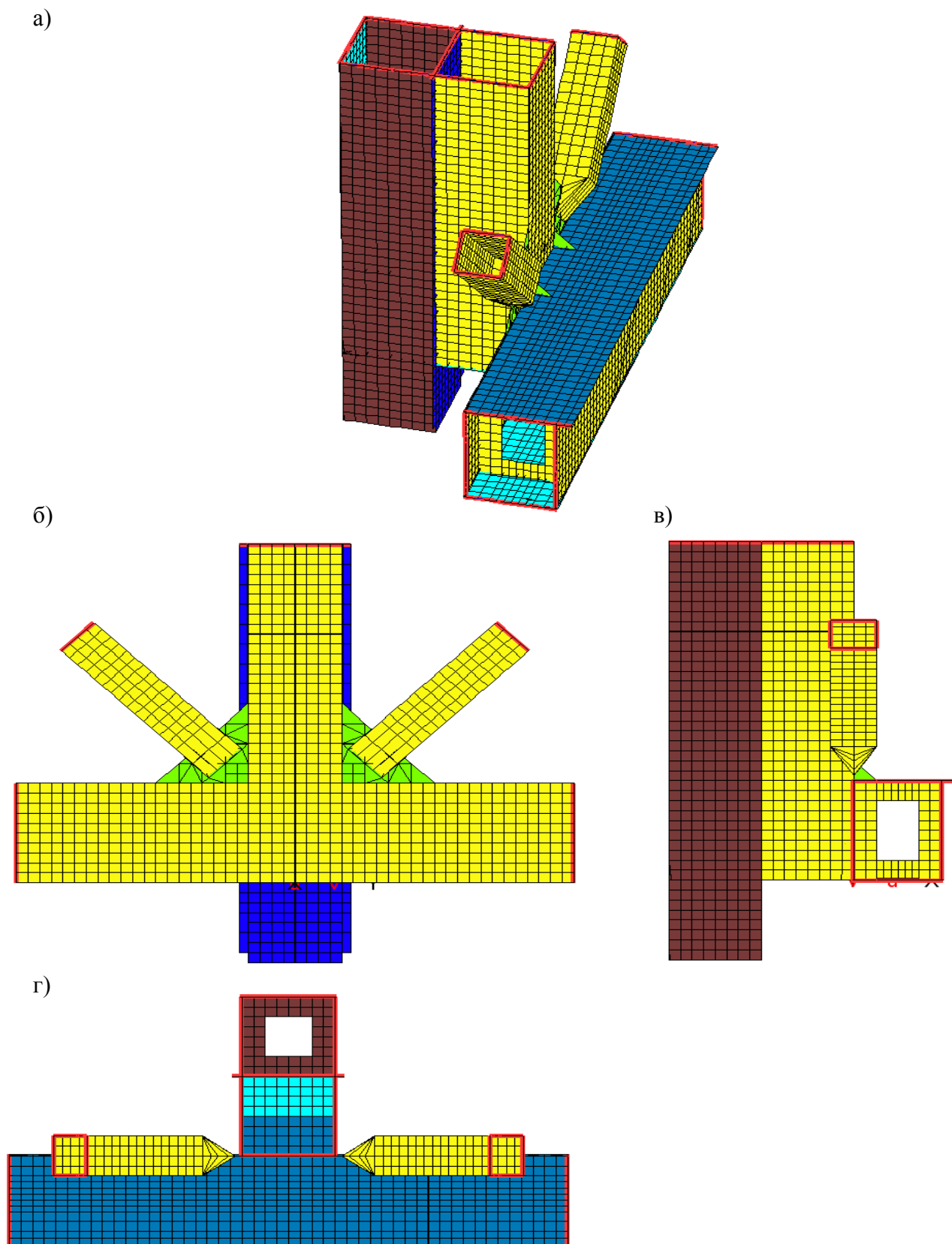


Рис. 2.39. Конечно-элементная модель узла (сопряжение ездовых балок, элементов решетки ферм, П-образных рам и элементов опор):  
а – аксонометрическая схема, б – фронтальный вид, в – вид сбоку, г) вид сверху

Оценка максимальных касательных напряжений в точке выполнялась по критерию Треска [40, 80, 81]:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1}{2}. \quad (2.39)$$

Переход от нормальных и касательных напряжений к эквивалентным в рамках плосконапряженного состояния выполнен по формуле:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}, \quad (2.40)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – главные нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям;

$\tau_{xy}$  – касательные напряжения.

Локальные напряжения в конструкциях мостовых перегружателей возникают в зоне сопряжения верхнего пояса и стенки ездовых балок.

В балках амплитудная составляющая генерируется прокатыванием волн деформаций от колеса в ее верхней зоне [82], так как все усталостные разрушения концентрируются в верхней зоне балок.

Общий случай работы механизма или конструкции на циклические воздействия – это асимметричный цикл нагружения (рис. 2.40), который легко раскладывается на статические  $\tau_m$  и динамические напряжения действующие с симметричным циклом  $\tau_1$ .

Следовательно, асимметричный цикл состоит из среднего напряжения  $\tau_m = 0,5 (\tau_{max} + \tau_{min})$  на которое наложен симметричный цикл с амплитудой:

$$\tau_{-1} = 0,5 \cdot (\tau_{max} - \tau_{min}).$$

Многочисленными исследованиями машиностроителей [6, 83, 84, 85, 86] экспериментально и теоретически установлено - усталостные разрушения в первую очередь возникают от динамической амплитудной составляющей  $2\tau_a$  переменных напряжений.

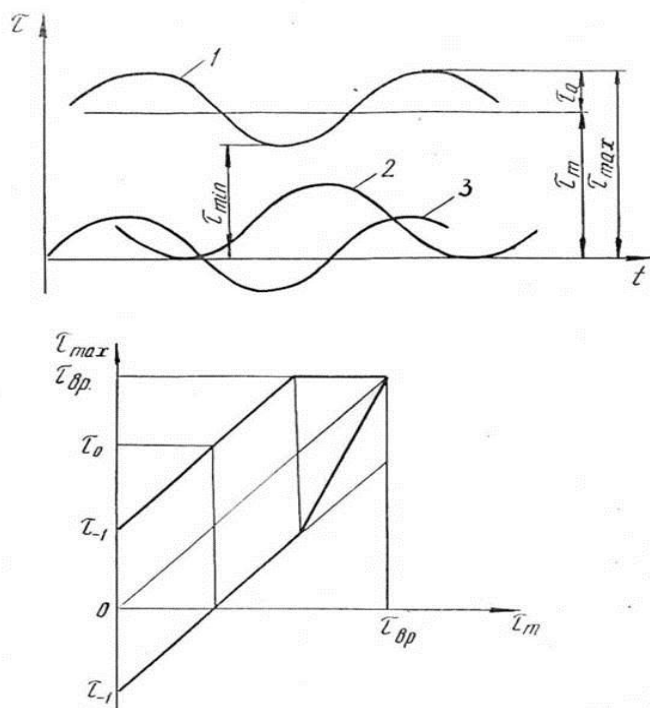


Рис. 2.40. Циклическое изменение касательных напряжений:  
 а – асимметричный (1),  
 пульсирующий (2) и симметричный (3);  
 б – диаграмма Смита

Посредством моделирования по методу конечных элементов проведено построение полей напряжений, возникающих от действия давления колеса крана на рельс и передача на верхний пояс ездовой балки, в месте стыка полки и стенки балки. Нагрузка принята согласно работам К.К. Нежданова [82] распределенной по косинусоидальному закону  $q(\theta) = q_0 \cdot \cos 2 \omega \cdot \theta$ .

Следует отметить, что усталостные разрушения в ездовых балках происходят при упругой работе материала, то есть, сохраняется прямая пропорциональная зависимость между деформациями и напряжениями поэтому в дальнейшем при обработке результатов расчетов коэффициентом характеризующим резерв несущей способности, обусловленного пластической работой материала будем пренебрегать.

В зоне сопряжения пояса подкрановой балки со стенкой при действии локальных воздействий  $P$ ,  $T$ ,  $M_{кр}$ , возникает сложное напряженное состояние, волнообразно изменяющееся при проходе колес тележки. На поверхностях стенок возникает плоское напряженное состояние.

Локальные динамические воздействия от колес тележки:

$P_{lok}$  – вертикальное;

$T_{lok}$  – горизонтальное поперечное;

$T_{lok}^{пр}$  – горизонтальное продольное;

$M_{lok}^{кр}$  – крутящий момент, передается через рельс на балку и далее через крепления на опору.

По принципу Сен-Венана [87] возмущения быстро затухают, по этому; в первую очередь повреждаются рельсы и их крепления, затем балки и их крепления.

Очевидно также [83, 85], что разрушения вызываются динамической составляющей, а статическая составляющая создает фон.  $P_{loc}$  передается через рельс на балку и вызывает целую гамму локальных напряжений, возникающих в верхней части её стенки при центральном сжатии:

$\sigma_{ylok}$  – сжимающие напряжения, уравнивающие вертикальное воздействие;

$\sigma_{xlok}$  – нормальные напряжения, ориентированные параллельно горизонтальной оси  $x$ ;

$\tau_{xylok}$  – касательные напряжения по площадкам нормали, к которым являются оси  $x$  и  $y$ .

Воздействия  $T_{lok}$  и  $M_{lok}^{кр}$  вызывают локальные напряжения при кручении верхнего пояса:

$\sigma_{ylok}^{кр}$  и  $\sigma_{xlok}^{кр}$  – нормальные и  $\tau_{xylok}^{кр}$  – касательные напряжения.

Нормальные и касательные локальные напряжения возникают при воздействии колеса тележки. При движении же тележки возникают волны деформаций и напряжений, перемещающиеся поступательно, вслед за колесом. По принципу Сен-Венана эти возмущения быстро затухают.

Складываясь, они достигают главных значений:

$\Sigma \sigma_{2lok} = \sigma_{2lok} + \sigma_{2lok}^{кр}$  – суммарное напряжение, где  $\sigma_{2lok}$  – при центральном, а  $\sigma_{2lok}^{кр}$  – при внецентренном сжатии;

$\Sigma \sigma_{1lok} = \sigma_{1lok} + \sigma_{1lok}^{кр}$ ;

$\sum \tau_{1,2max}^{lok} = 0,5 (\sum \tau_{1lok} + \tau_{2lok})$  – наибольшее касательное напряжение по площадкам нормали, к которым являются главные оси 1 и 2;

$\sum \tau_{2max}^{lok} = 0,5 |\sum \sigma_{2lok}|$  – наибольшее касательное напряжение, действующее в поверхностном слое стенки по площадке.

Пульсирующие локальные напряжения периодически, волнообразно пробегающие вдоль балки, являются одним из самых неблагоприятных видов напряженного состояния с точки зрения выносливости. Идеальной стали не существует, поэтому в силу статической теории усталостной прочности [88] обнаруживается наиболее слабое место из всего объема волнообразно нагружаемого материала, откуда и зарождается усталостная трещина. Связь между числом циклов до появления усталостных трещин и уровнем пульсирующих напряжений в образце или детали была получена Веллером [89]. В логарифмических и полулогарифмических координатах эта связь близка к линейной [84, 90].

Поэтому остаточный ресурс конструкций, в первую очередь, зависит от интенсивности эксплуатации. Как уже отмечалось, на остаточный ресурс в сильной степени влияет жесткость взаимодействующих систем. С этой позиции наиболее неблагоприятные возмущения на конструкции передаются от непрерывного двухсменного режима эксплуатации, причем, масса поднимаемого груза близка номинальной.

Условную зависимость между НДС, рассчитанным по пространственной стержневой схеме и модели узла по пространственной схеме с конечными элементами типа «оболочка», возможно, построить через эквивалентные напряжения, а знак напряжений в точке, учитывая их инвариантность, необходимо определять по нормальным напряжениям. Рассматриваемые узлы сопряжения ездых балок с элементами фермы представлены на рис. 2.41.

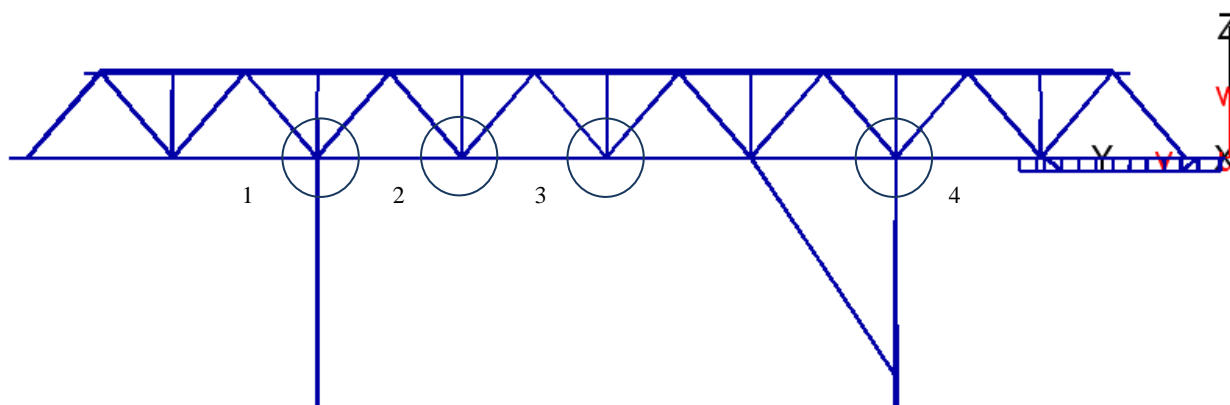


Рис. 2.41. Узлы для моделирования

Рассматриваемые сечения ездых балок в модели узла представлены на рис. 2.42.

Характерные зоны в сечениях ездых балок представлены на рис. 2.43.

На основании статистической обработки теоретических коэффициентов конструктивной концентрации  $k_t$  были получены средние значения коэффициентов по каждой точке поперечного сечения ездых балки (табл. 2.6).

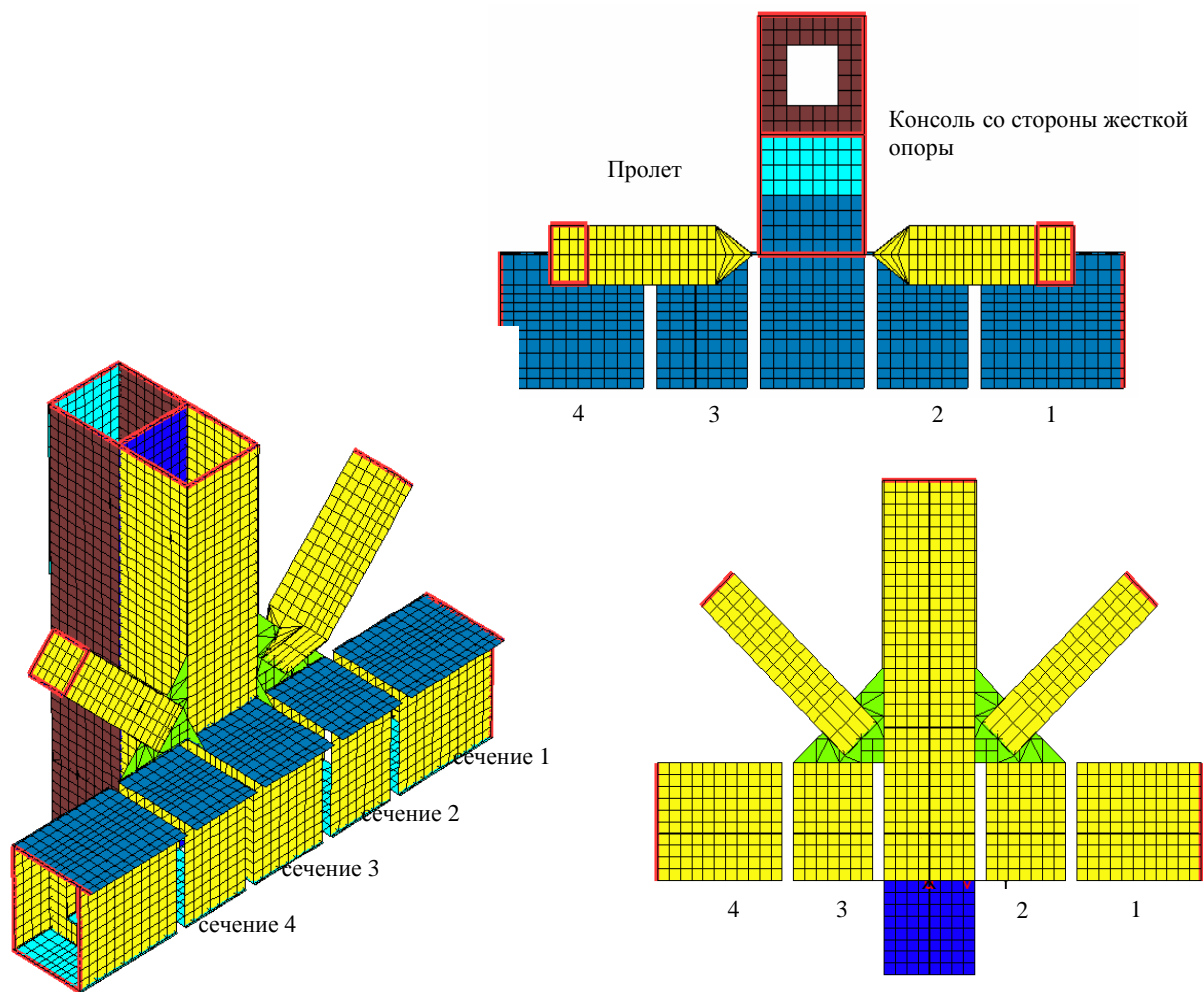


Рис. 2.42. Конечно-элементная модель узла с сечениями ездовой балки

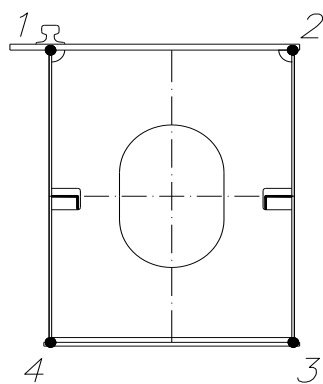


Рис. 2.43. Поперечное сечение ездовой балки с характерными зонами

Таблица 2.6

Теоретические коэффициенты конструктивной концентрации напряжений

Узел	Характерные зоны сечения	Сечение с краевым эффектом			Сечение без краевого эффекта		
		$k_t$	$k_t$	Среднее значение $k_t$	$k_t$	$k_t$	Среднее значение $k_t$
		Тележка над сечением	Без тележки		Тележка над сечением	Без тележки	
1	1	1,47	1,18	1,32	1,18	1,06	1,12
	2	3,27	2,62	2,94	1,96	1,57	1,77
	3	1,59	1,27	1,43	1,35	1,08	1,22
	4	1,45	1,16	1,31	1,23	1,05	1,14
2	1	1,44	1,15	1,30	1,15	1,04	1,09
	2	2,88	2,30	2,59	1,73	1,38	1,56
	3	1,49	1,19	1,34	1,27	1,01	1,14
	4	1,37	1,10	1,23	1,14	0,97	1,05
3	1	1,45	1,16	1,31	1,16	1,04	1,10
	2	2,99	2,39	2,69	1,79	1,44	1,61
	3	1,46	1,17	1,31	1,24	0,99	1,12
	4	1,35	1,08	1,22	1,12	0,95	1,04
4	1	1,50	1,20	1,35	1,20	1,08	1,14
	2	3,60	2,88	3,24	2,16	1,73	1,94
	3	1,62	1,30	1,46	1,38	1,10	1,24
	4	1,41	1,20	1,30	1,20	1,02	1,11

Теоретические коэффициенты конструктивной концентрации  $k_t$  получены при переходе от стержневой к пространственной модели с КЭ типа «оболочка» по формуле:

$$k_t = \frac{\sigma_{об}}{\sigma_{ст}}, \quad (2.41)$$

где  $\sigma_{об}$  – напряжения в пространственной модели с КЭ типа «оболочка»;

$\sigma_{ст}$  – напряжения в пространственной стержневой модели.

Анализ и сравнение результатов расчета пространственной стержневой модели и модели с конечными элементами типа «оболочка» показали, что стержневая модель расчета не в полной мере отражает действительное НДС материала несущих конструкций мостовых перегружателей.

Теоретические коэффициенты конструктивной концентрации  $k_t$  с краевым эффектом при переходе от пространственной стержневой модели к пространственной модели с конечными элементами типа оболочка варьируются от 1,22 до 3,24.

Теоретические коэффициенты конструктивной концентрации  $k_t$  без краевого эффекта при переходе от пространственной стержневой модели к пространственной модели с конечными элементами типа оболочка варьируются от 1,04 до 1,94.

### Глава 3

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЕЗДОВЫХ БАЛОК МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

### 3.1. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ ЕЗДОВЫХ БАЛОК МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ В РАСЧЕТНОМ СЕЧЕНИИ ТРЕЩИН И ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ

Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкций при наличии в расчетном сечении трещиноподобных дефектов сварки (пор, подрезов, непроваров, неметаллических включений и т.д.), обнаруженных в процессе обследований или выявленных в результате дефектоскопического контроля либо трещин, появившихся на стадиях изготовления, транспортировки, монтажа или эксплуатации, определяется стадией роста усталостной трещины до критических размеров.

Число циклов до достижения трещиной критического размера определяется по формуле

$$N_{\text{рт}} = N_{\text{пов}} + N_{\text{ск}}, \quad (3.1)$$

где  $N_{\text{пов}}$  – число циклов, характеризующее период развития поверхностной трещины до превращения ее в сквозную;

$N_{\text{ск}}$  – число циклов, характеризующее период развития сквозной трещины до критических размеров.

Поскольку в настоящее время мостовые перегружатели металлургических комплексов эксплуатируются 40 и более лет и, как показывают результаты натурных обследований, в узлах ездовых балок имеются исходные усталостные трещины, то производится оценка остаточного ресурса на стадии роста сквозной трещины, так как трансформация дефектов сварки в поверхностные трещины и превращение поверхностных трещин в сквозные уже произошло. Блок-схема методики оценки ресурса ездовых балок мостовых перегружателей представлена на рис. 3.1.

Оценку остаточного ресурса ездовых балок мостовых перегружателей необходимо производить начиная с анализа технической документации и опроса персонала по ранее выполненным обследованиям и ремонтно-восстановительным работам, после чего необходимо провести натурное обследование технического состояния конструкции перегружателя.

На основании выявленных дефектов, в результате визуального обследования и неразрушающих методов контроля, производится анализ причин их возникновения. Для оценки остаточного ресурса узлов мостовых перегружателей необходимо изучить напряженно-деформированное состояние узлов балок, режимы нагружения, влияние температур климатического диапазона на механические характеристики используемых сталей и другие факторы, оказывающие влияние на нормальную эксплуатацию кранов. Оценка остаточного ресурса производится по предлагаемой методике, после чего даются рекомендации по усилению конструкций и дальнейшей эксплуатации.





Рис. 3.1. Схема методики оценки ресурса ездových балок мостовых перегружателей металлургических производств

Влияние климатических температур и механической неоднородности зон сварных соединений учитывается путем суммирования приращения длины трещины, определенной для каждого температурного периода с условно постоянной температурой и каждой зоны, через которую происходит рост трещины: металл шва (МШ), околосшовная зона (ОШЗ), основной металл (ОМ) с использованием соответствующих данной температуре и зоне характеристик циклической трещиностойкости (рис. 3.2). Ресурс конструкции исчерпывается периодом, при котором сумма приращений длины трещины равна ее критическому размеру.

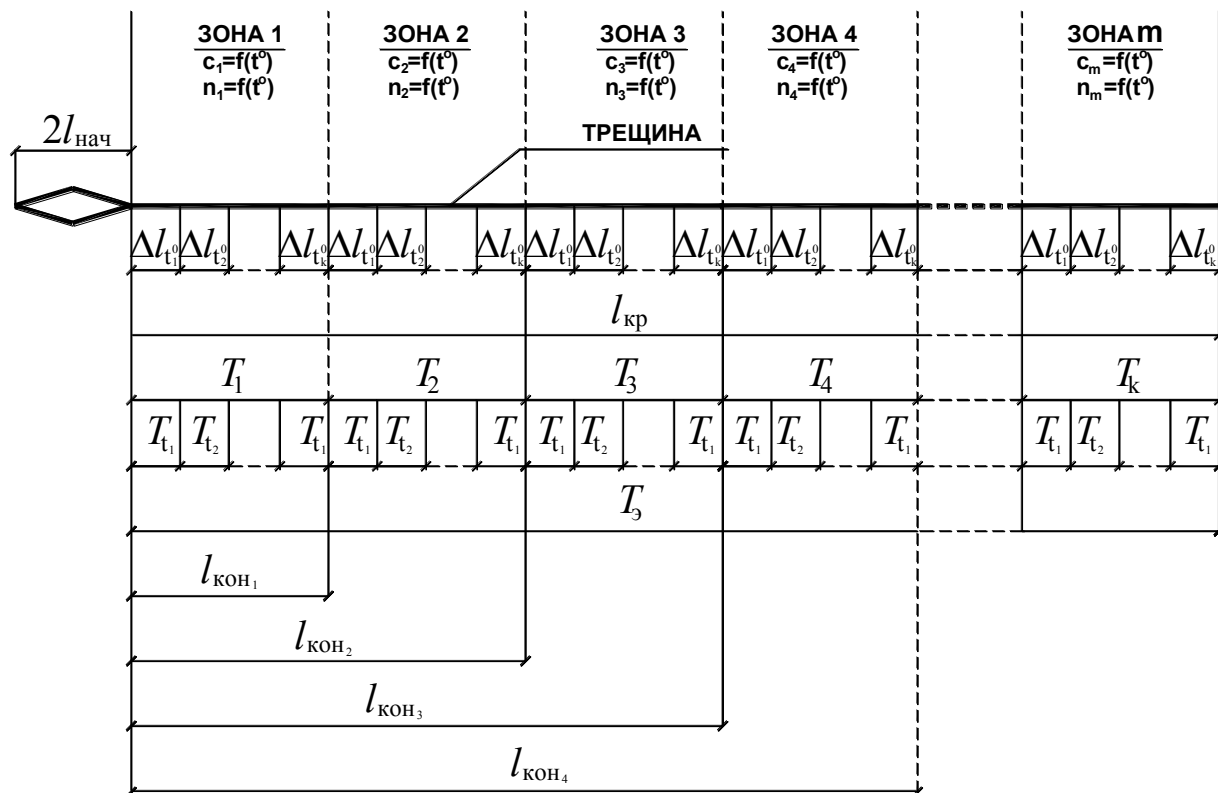


Рис. 3.2. Учет влияния низких температур климатического диапазона и неоднородности механических свойств стали и зон сварных соединений

Методика оценки остаточного ресурса ездовых балок мостовых перегружателей основана на положениях механики разрушения, согласно которым число циклов до разрушения конструкции определяется интегрированием уравнения Пэриса-Эрдогана, описывающего скорость роста усталостной трещины:

$$\frac{dl_{i,j}}{dN_{t_i^0}} = C_{i,j}(\Delta K)^{n_{i,j}}, \quad (3.2)$$

где  $i$  – номер периода с условно-постоянной температурой;

$j$  – номер зоны (МШ, ОШЗ, ОМ), через которую происходит рост трещины.

При этом значения размаха КИН  $\Delta K$  для трещин, развивающихся в узлах эксплуатируемых ездовых балок мостовых перегружателей определяется по известной формуле:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = (\sigma_{max} - \sigma_{min})_n \sqrt{\pi l_0} \cdot f_{1K}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_{max,n}$  и  $\sigma_{min,n}$  – номинальные напряжения в сечении, ослабленном трещиной;

$\ell_0$  – начальная величина трещиноподобного дефекта либо обнаруженная трещина;  
 $f_{IK}$  – поправочная функция, значение которой зависит от формы элемента конструкций, способа нагружения конструкций и вида трещин.

Интегрирование уравнения (3.3) в пределах изменения длины трещины от  $l_{нач_{i,j}}$  до  $l_{кон_{i,j}}$  дает выражение по определению числа циклов нагружения  $N_{t_i^0}$ , необходимых для прорастания трещины в одной из зон с параметрами  $C_{i,j}$  и  $n_{i,j}$  в интервале  $T_{t_i^0}$ :

$$- N_{t_i^0} = \frac{2}{C_{i,j}(n_{i,j} - 2)(f_{1K} \gamma_{ост} \cdot \Delta\sigma_{нач})^{n_{i,j}}} \left( \frac{1}{l_{нач_{i,j}}^{(n_{i,j}-2)/2}} - \frac{1}{l_{кон_{i,j}}^{(n_{i,j}-2)/2}} \right) \quad (3.4)$$

Зная число циклов нагружения  $N_{t_i^0}$ , определяется неизвестный параметр  $l_{кон_{i,j}}$ :

$$l_{кон_{i,j}} = l_{нач_{i,j}} \left( \frac{2}{2 - N_{t_i^0} \cdot C_{i,j} (n_{i,j} - 2) l_{нач_{i,j}}^{(n_{i,j}-2)/2} (f_{1K} \gamma_{ост} \cdot \Delta\sigma_{нач})^{n_{i,j}}} \right)^{2/(n_{i,j}-2)} \quad (3.5)$$

Определяется приращение трещины  $\Delta l_{i,j}$

$$\Delta l_{i,j} = l_{кон_{i,j}} - l_{нач_{i,j}} \quad (3.6)$$

где  $l_{кон_{i,j}}$  – конечная длина трещины в интервале  $T_{t_i^0}$ , определяемая по формуле

$$l_{кон_{i,j}} = l_{нач_{i,j}} + \sum_{i=1}^k (\sum_{j=1}^m \Delta l_{i,j}) = l_{кр} \quad (3.7)$$

При этом критическая длина трещины  $l_{кр}$  определяется из условия вязкого либо хрупкого разрушения.

Считая, что  $l_{кон_{i,j}} = l_{нач_{i+1,j}}$ , либо  $l_{кон_{i,j}} = l_{нач_{i,j+1}}$  вычисляем  $\Delta l_{i,j}$  по формулам (3.6) и (3.7).

Ресурс конструкции исчерпывается периодом, при котором сумма приращений длины трещины равна ее критическому размеру (формула 3.7) и определяется по формуле:

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k T_{t_i^0} \quad (3.8)$$

При этом

$$T_{t_i^0} = N / \omega_{\text{экс}}, \quad (3.9)$$

где  $\omega_{\text{экс}}$  – частота эксплуатационного нагружения конструкции.

### **Пример расчета остаточного ресурса ездовой балки**

Ресурс циклически нагруженных стальных неразрезных балок определяется на стадии роста усталостной трещины. Рассмотрен пример оценки ресурса ездовой балки коробчатого сечения мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК».

Исходный дефект в виде трещины длиной  $2l_0=5$  см обнаружен в середине пролетной части в месте сопряжения продольного и поперечного ребер жесткости с нижним поясом ездовой балки (рис. 3.3).

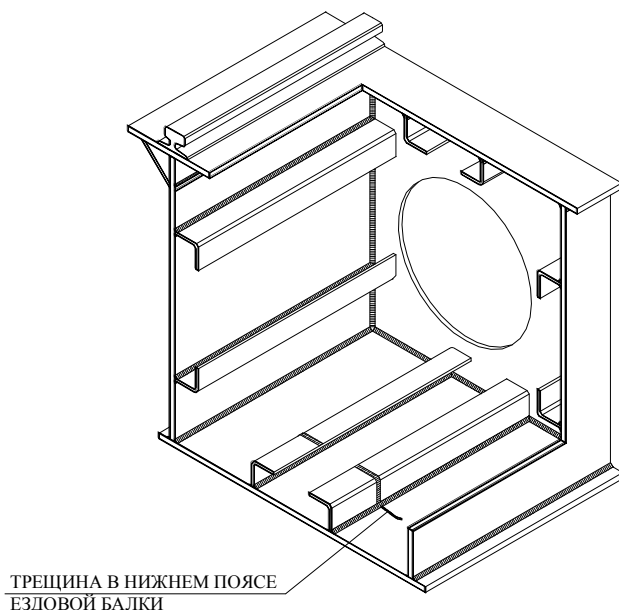


Рис. 3.3. Схема расположения трещины в нижнем поясе ездовой балки мостового перегружателя №6 КХП ОАО «ММК»

Напряжения, действующие в вершине трещины  $\sigma_{\text{н}} = 3000 \text{ кгс/см}^2$ . Материал ездовой балки – сталь 14Г2АФ:  $\sigma_{\text{т}} = 5200 \text{ кгс/см}^2$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 7000 \text{ кгс/см}^2$ .

Ездовая балка эксплуатируется при влиянии низких климатических температур до  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Расчет произведен при помощи разработанной программы «Остаточный ресурс». Алгоритм программы представлен на рис. 3.4.

Программа «Остаточный ресурс» представляет собой диалоговое окно, в которое вводятся данные о начальной длине трещины, максимальном и минимальном напряжениях в сечении ослабленном трещиной, а также частоте эксплуатационного нагружения конструкции (рис. 3.5).

Имеется библиотека параметров статической и циклической трещиностойкости сталей, наиболее широко применяемых при производстве ездовых балок (09Г2С, 14Г2АФ, Вст3сп), а также зон сварных соединений. Программа вычисляет критическую длину трещины из условия вязкого или хрупкого разрушения и позволяет проанализировать процесс роста усталостной трещины в условиях механической неоднородности, а именно расчет роста усталостной трещины производится как вдоль сварного шва, так и поперек, при этом учитываются параметры трещиностойкости основного металла, металла шва и околошовной зоны.

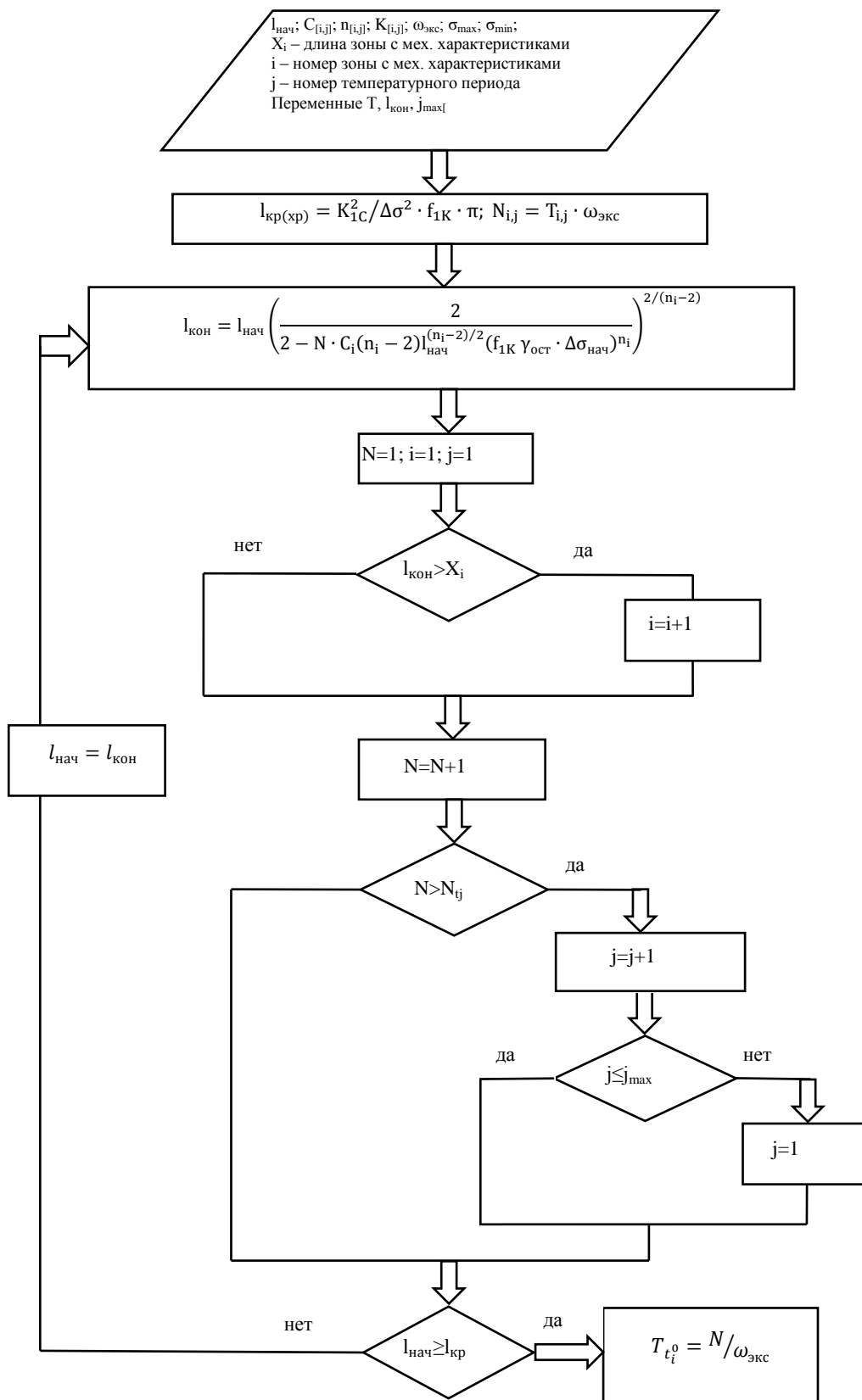


Рис. 3.4. Алгоритм программы «Остаточный ресурс»

**Ввод начальных данных**

Начальная длина трещины (L нач)

Минимальное напряжение в сечении, ослабленном трещиной

Максимальное напряжение в сечении, ослабленном трещиной

Частота эксплуатационного нагружения конструкции

Процесс распространения

Вдоль шва

Поперек шва

09Г2С

14Г2АФ

ВСт3сп

Длина 1 зоны (МШ)

Длина 2 зоны (ОШЗ)

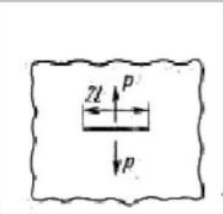
Введите угол между швом и трещиной

Выберите случай для нахождения поправочной функции

Введите месяц начала испытаний

Случай 2 | Случай 3 | Случай 4 | Случай 5 | Случай 6 | Случай 7 | Случай 8 | Случай 9 | Случай 10 | Случай 11 | Случай 1

Введите силу, приложенную к середине свободной поверхности трещины



Label10

Выход

Вычислить процесс распространения поперек прокатки

Вычислить процесс распространения вдоль прокатки

Рис. 3.5. Интерфейс программы «Остаточный ресурс»

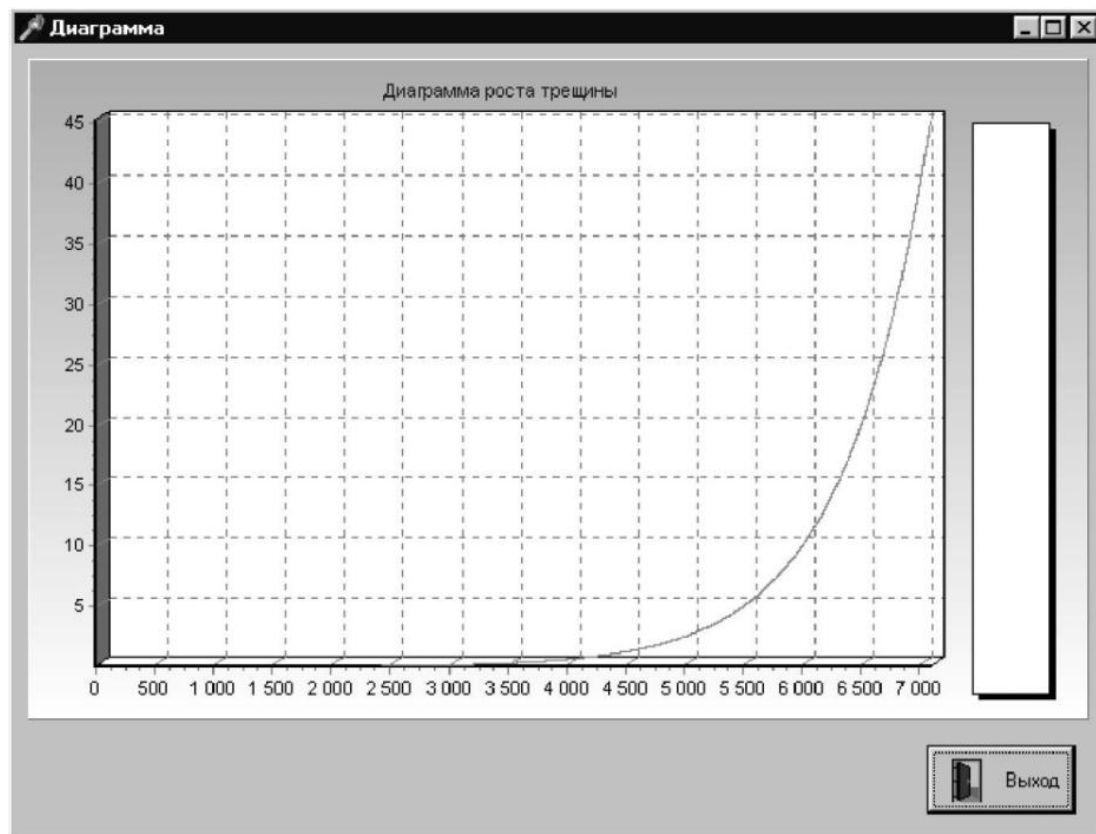


Рис. 3.6. Диаграмма зависимости роста усталостной трещины (см) от периода эксплуатации (дни)

Значения функций  $f_{Ik}$ , характеризующей форму элемента конструкций, способ нагружения конструкции и вид трещин, представленные в программе «Остаточный ресурс», получены в ряде работ [66, 196]. Для определения поправочной функции  $f_{Ik}$  существует блок, в котором рассмотрены 13 случаев поправочной функции для пластин, стержней и оболочек. Таким образом, программу «Остаточный ресурс» можно рассматривать как не только направленную на решение узкоспециальных задач по определению ресурса ездовых балок мостовых перегружателей, но и как универсальную, позволяющую определить ресурс для различных конструкций. Программа «Остаточный ресурс» позволяет учитывать влияние на распространение усталостной трещины такого фактора как анизотропия прокатки, путем выбора опций «Вычислить процесс распространения поперек прокатки», «Вычислить процесс распространения вдоль прокатки». Для визуализации результатов расчета программа позволяет строить зависимости роста усталостной трещины от периода эксплуатации конструкции (рис. 3.6).

В результате расчета установлено, что критическая длина трещины  $l_{кр}=45$  см (см. рис. 3.6) достигнута при  $T=3000$  дней при среднесуточной частоте нагружения 1100 циклов, что при непрерывном производстве составляет 8,2 года.

### **3.2. УЧЕТ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НА СТАДИИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ЕЗДОВЫХ БАЛОК МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ПРИ ФАКТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Назначение расчетных параметров для расчета остаточного ресурса ездовых балок.*

Оценку остаточного ресурса при циклических нагружениях с трещиноподобными дефектами, выявленными при обследовании или экспертизе, производим по параметрам роста усталостной трещины до критических размеров. По данному направлению выполнено достаточно большое количество работ по механике разрушения [9, 29, 30, 91-120].

В качестве базовых методов для оценки остаточного ресурса принимаем инженерную методику расчета, предложенную В.П. Когаевым [97] и методику в соответствии с основными положениями механики разрушения при циклическом нагружении, согласно которым число циклов до разрушения конструкций определяется интегрированием уравнения Пэриса-Эрдогана, описывающего скорость роста усталостной трещины.

В нашем случае для расчета остаточного ресурса необходимо располагать следующими исходными данными:

- характеристиками стали;
- напряженно-деформированным состоянием элементов;
- параметрами нагружения и работы (частотой и режимом);
- эксплуатационными особенностями.

Так как в нашей работе не выделялась задача по определению свойств сталей в климатическом диапазоне температур и различных зон, параметры характеристик сталей определяем исходя из имеющихся в литературе и научных работах данных, т.е. проведя обзор. За-

висимости свойств сталей от температуры позволяют нам учесть климатические особенности, а различные свойства сталей для зон сварного соединения (МШ, ОШЗ и ОМ) учесть изменение параметров статической и циклической трещиностойкости.

Определение НДС элементов и зон, является частной задачей, для каждого мостового перегружателя определенного конструктивного решения необходимо рассчитывать НДС зоны расположения трещиноподобного дефекта.

Параметры нагружения и работы мостовых перегружателей изменяются прежде всего от его назначения и никак не связаны с конструктивными особенностями, и зависят прежде всего от производственного комплекса. Общим блоком нагружения для перегружателей будет блок ветрового нагружения, который зависит только от региона и характеристик ветрового потока.

Режим работы перегружателей для различных производственных комплексов и предприятий, можно свести к общему блоку работы, приняв данное предположение как предпосылку. Построение общего режима нагружения разделили на функциональные действия: передвижение вдоль пути перегружателя, работа грейферной тележкой и периоды простоя (рис. 3.7)

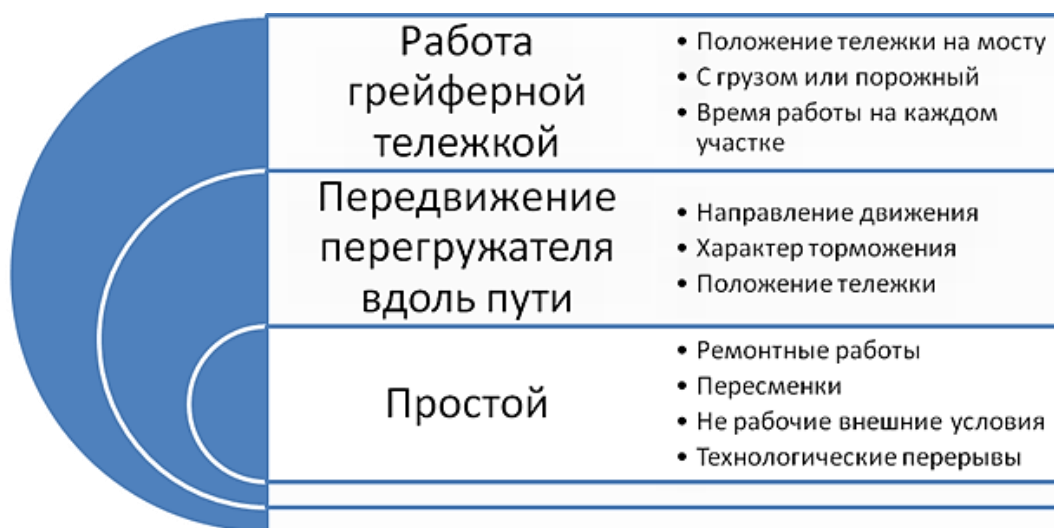


Рис. 3.7. Принципиальная схема технологического блока нагружения

### ***Построение блоков режимов нагружения***

Построение блоков выполнено методом блочного моделирование и полностью отражает принцип суперпозиций (независимости) на этапе их развертывания на временную шкалу. Общая схема представлена на рис. 3.8.

**Ветровой блок нагружения.** Ветровое нагружение является одним из сложнейших для представления модели фактического нагружения. Прежде всего ветер - это движение воздуха которое и оказывает давление на препятствие создавая при том нагрузку. Но ветер как явление с точки зрения математической модели характеризуется прежде всего как случайное нестационарное воздействие.





Рис. 3.8. Принципиальная схема построения блоков нагружения

Математическая модель ветрового воздействия в работе [115] принята, основываясь на принципах логистического построения, вероятностных распределений и статистических наблюдений изложенных в работах Р.П. Бернгардта [121]. В полученной модели ветрового нагружения заложены принципы блочного пошагового моделирования и математические зависимости удовлетворяющие нормативным параметрам действующих стандартов.

Краткая принципиальная схема ветрового блока представлена на рис. 3.9. В работе [115], помимо скоростных характеристик, моделировалось и вероятность распределения по румбам. В данной работе принята предпосылка (допущение или упрощение) что ветер воздействует только в двух направлениях на фронтальную поверхность.

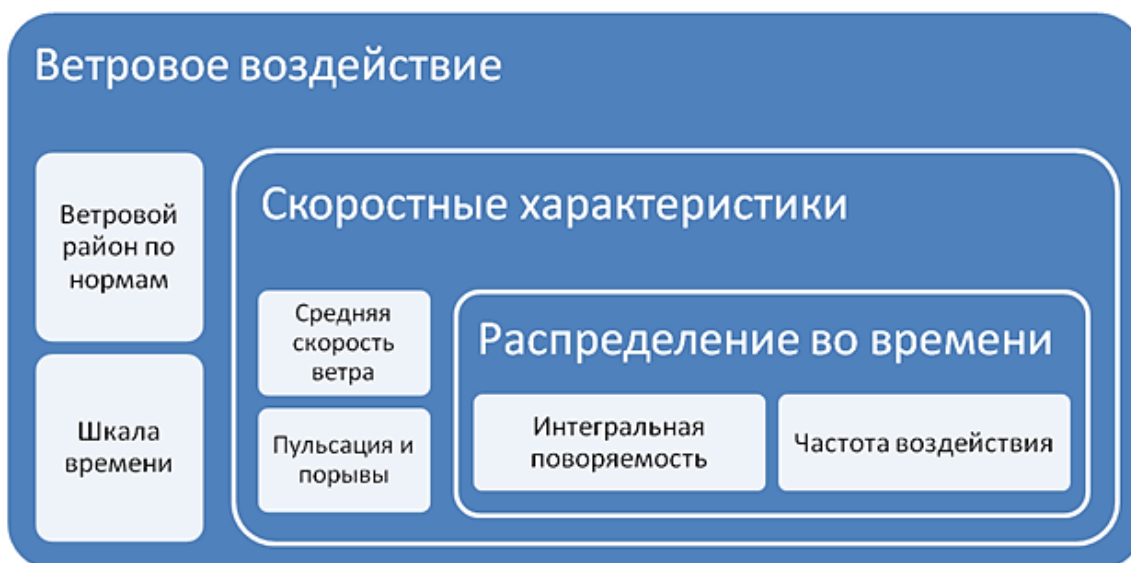


Рис. 3.9. Принципиальная схема ветрового блока нагружения

Математический аппарат, позволяющий сгенерировать блок циклического ветрового нагружения методом случайных величин с заданными характеристиками распределения, удовлетворяет общепринятым энергетическим спектрам Давенпорта и Ван дер Ховена [115] и полностью соответствует графику интегральной повторяемости (рис. 3.10).

Фрагмент сгенерированного блока циклического ветрового нагружения представлен на рис. 3.11.

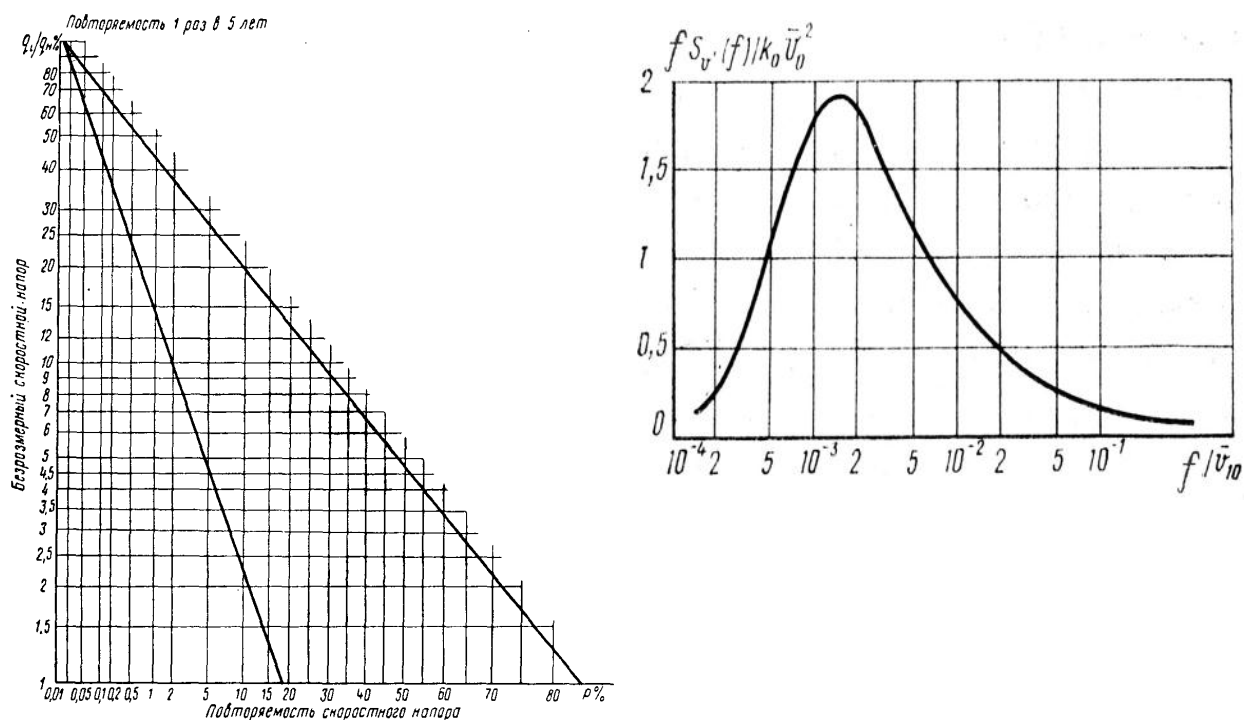


Рис. 3.10. Интегральная безразмерная повторяемость скоростей ветра и спектр Давенпорта

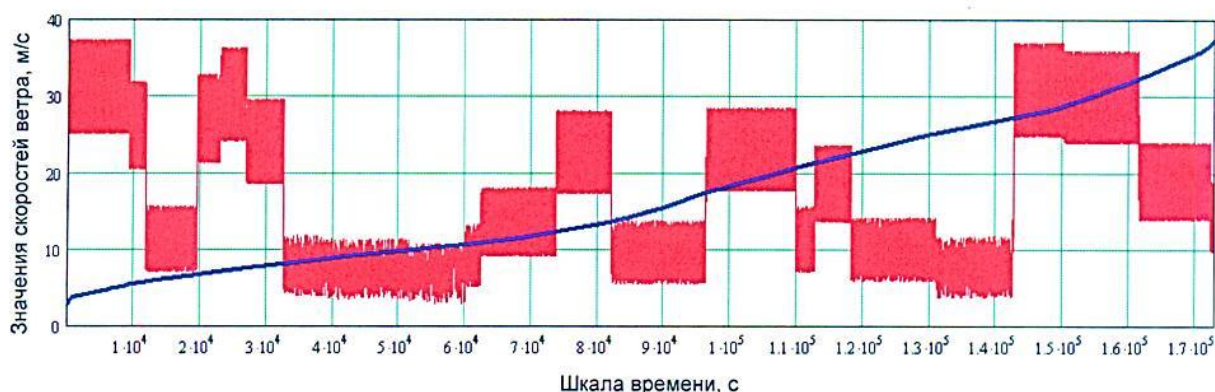


Рис. 3.11. Фрагмент сгенерированного блока ветрового воздействия

*Инерционный блок нагружения.* На основании наблюдений и регистрации режимов работы мостовых перегружателей в течение месяца и данных с регистратора параметров нагружения были получены количественные характеристики, которые позволили систематизировать их работу. Общие принципы параметров, влияющие на НДС материала несущих

конструкций мостовых перегружателей от воздействий, обусловленных перемещением вдоль пути, представлены на рис. 3.12.

На основании наблюдений режима работы мостовых перегружателей получены следующие данные:

- длинные переезды (более 10 метров) – до 10 раз за смену;
- короткие переезды (до 10 метров) – до 15 раз за смену.



Рис. 3.12. Принципиальная логистическая блок-схема передвижения мостового перегружателя

*Технологический блок нагружения.* Поступивший по железной дороге и высыпаемый в приемный бункер с помощью передвижных вагоноопрокидывателей уголь, забирается грейфером перегружателя и разгружается на складские штабелы (рис. 3.13). В случае необходимости из этих штабелей уголь забирается и доставляется к находящимся на рельсовых путях вагонам, загружаемым с помощью перегрузочной воронки перегружателя (рис. 3.14).

На основании регистрации разгрузки угля на складские штабелы перегружателем получены следующие данные:

Вариант I

- подъем груза – 160 раз;
- тележка загружается в пролете со стороны гибкой опоры – 160 раз;
- тележка разгружается в пролете со стороны жесткой опоры – 160 раз.

Вариант II

- подъем груза – 160 раз;
- тележка загружается на консоли со стороны гибкой опоры – 160 раз;
- тележка разгружается на консоли со стороны гибкой опоры – 53 раза;
- тележка разгружается в пролете со стороны гибкой опоры – 107 раз.

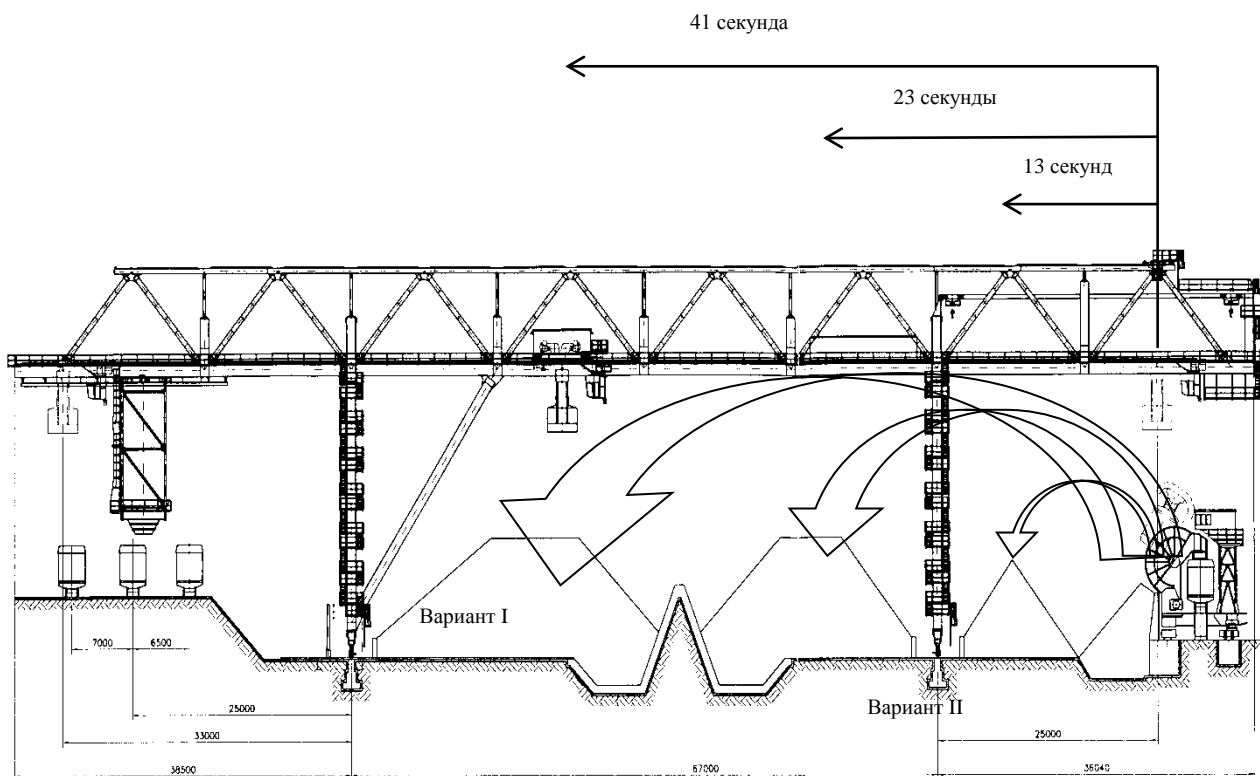


Рис. 3.13. Технологическая схема разгрузки угля грейфером перегружателя на складские штабелы (время передвижения тележки в секундах)

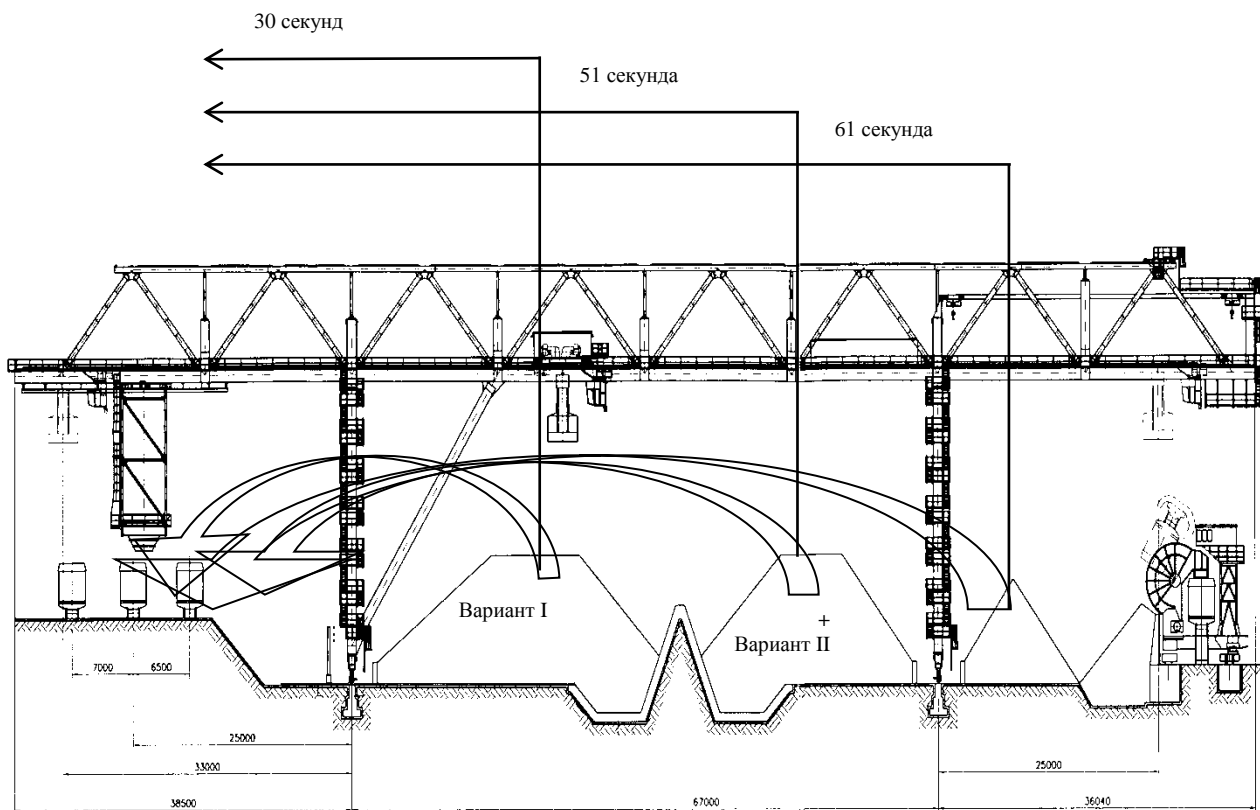


Рис. 3.14. Технологическая схема загрузки углем вагонов подвижных железнодорожных составов (время передвижения тележки в секундах)

На основании регистрации погрузки угля в вагоны перегружателем получены следующие данные:

Вариант I

- подъем груза – 160 раз;
- тележка загружается в пролете со стороны жесткой опоры – 160 раз;
- тележка разгружается на консоли со стороны жесткой опоры – 160 раз.

Вариант II

- подъем груза - 160 раз;
- тележка загружается на консоли со стороны гибкой опоры – 53 раза;
- тележка загружается в пролете со стороны гибкой опоры – 107 раз;
- тележка разгружается на консоли со стороны жесткой опоры – 160 раз.

Принципиальные технологические действия работы грейферной тележки представлены на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Принципиальная логистическая блок-схема работы грейферной тележки

Диаграмма рабочего цикла грейферной тележки мостового перегружателя №1 бис УПЦ КХП ОАО «ММК» из технологической карты перегружателя представлена на рис. 3.16.

**Корректировка алгоритма оценки и прогнозирования остаточного ресурса на стадии РУТ ездовых балок мостовых перегружателей с учетом инерционных воздействий**

Прогнозирование роста усталостных трещин в элементах конструкций, возможно произвести только при наличии информацией о закономерностях роста трещин при циклических нагрузках. Экспериментальное получение кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) весьма трудоемко.

Согласно [97] основной характеристикой циклической трещиностойкости материала является диаграмма усталостного разрушения. При этом по оси абсцисс откладываются размах КИН  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  (МПа $\sqrt{м}$ ), а по оси ординат – скорость развития усталостной трещины  $dl/dN$  (м/цикл). В некоторых случаях по оси абсцисс откладываются амплитуду КИН  $\Delta K/2$  или максимальное в цикле значение коэффициента интенсивности  $K_{max}$ , связанное с размахом напряжений соотношением  $K_{max} = \Delta K / (1 - R)$ , где  $R = K_{min}/K_{max}$  – коэффициент асимметрии цикла.

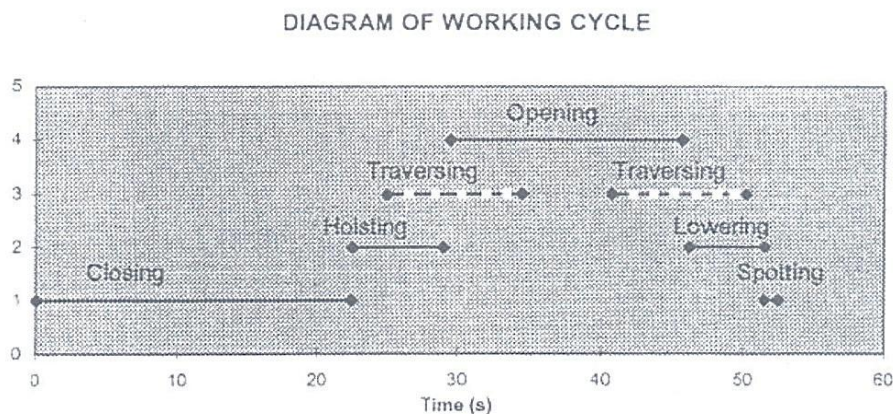


Рис. 3.16. Диаграмма рабочего цикла грейферной тележки

По осям координат применяют логарифмические шкалы, учитывая изменение скорости роста трещины  $dl/dN$  и размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  в широких пределах.

На рис. 3.16 показана диаграмма усталостного разрушения для малолегированной стали при различных коэффициентах асимметрии цикла нагружения.

Кривая построена из условия, что при стремлении  $K_{max}$  к критическому коэффициенту интенсивности напряжений для материала данной толщины при циклическом нагружении  $K_{fc}$  скорость развития трещины стремится к бесконечности,  $\Delta K_{fc} = K_{fc} (1-R)$ .

Таким образом, диаграммы усталостного разрушения являются S-образными кривыми, имеющими три характерные зоны: I, II, III (см. рис. 3.17). Границы этих зон могут изменяться в зависимости от типа металла, размеров образца, окружающих условий и других факторов [97].

В зоне II (см. рис. 3.17) значения  $dl/dN$  и  $\Delta K$  связаны зависимостью, которая может быть описана уравнением Пэриса-Эрдогана:

$$\frac{dl}{dN} = C (\Delta K)^n, \quad (3.10)$$

где  $\frac{dl}{dN}$  – скорость роста усталостной трещины;

$\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности напряжений;

$C, n$  – экспериментальные константы материала.

Коэффициент  $C$  и показатель степени  $n$  количественно характеризуют сопротивление росту трещины в области средних скоростей (условно линейный участок диаграммы, зона II)  $10^{-5} < dl/dN < 10^{-3}$  мм/цикл.

В упругой стадии работы материала, что соответствует НДС ездовых балок, определяли значения размаха коэффициента интенсивности напряжении (КИН) по известной формуле:

$$\Delta K = \Delta \sigma_{\text{ЭКВ}} \sqrt{\pi l_0} f_{IK}, \quad (3.11)$$

где  $\Delta \sigma_{\text{ЭКВ}}$  – размах значений эквивалентных напряжений;

$l_0$  – начальный размер трещины или трещиноподобного дефекта;

$f_{IK}$  – поправочная функция в зависимости от вида трещины, способа нагружения и формы элемента конструкций.

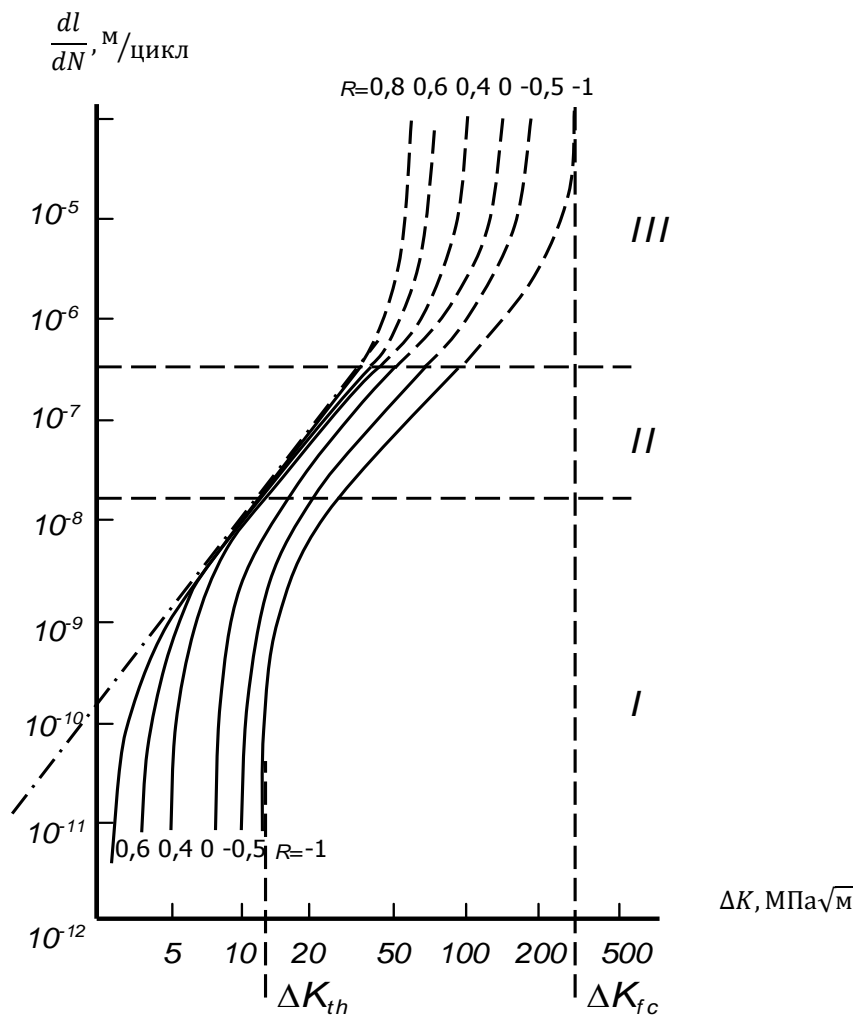


Рис. 3.17. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения малолегированной стали при различных коэффициентах асимметрии цикла нагружения

Значения размаха КИН в технологическом блоке работы грейферной тележки определяли по формуле:

$$\Delta K_p = (\Delta\sigma_p + \Delta\sigma_b)\sqrt{\pi l_0} f_{IK}, \quad (3.12)$$

где  $\sigma_p$  – размах значений напряжений при работе грейферной тележки;

$\sigma_b$  – размах значений напряжений при ветровом воздействии.

Значения размаха КИН в инерционном блоке определяли по формуле:

$$\Delta K_{\text{и}} = (\Delta\sigma_{\text{и}} \pm \Delta\sigma_b)\sqrt{\pi l_0} f_{IK}, \quad (3.13)$$

где  $\sigma_{\text{и}}$  – размах значений напряжений при инерционном воздействии.

На основе данных, полученных посредством моделирования в работе [48], на модели таврового соединения стенки и верхнего пояса подкрановой балки применяли формулу для определения поправочной функции  $f_{IK}$  в зависимости от длины трещины  $l$  и расстояния  $h_1$  от трещины до верхнего пояса:

$$f_{IK}(l, h_1) = 1,514l^{-0,381} \exp(1,847h_1 - 142,429h_1^2 - 0,0964 \ln^2(l) - 0,013 \ln^3(l)). \quad (3.14)$$

Общая схема определения остаточного ресурса использующая итерационный процесс вычисления, а не интегрирование уравнение Пэриса-Эрдогана представлена на рис. 3.18.

Далее рассмотрим методику определения параметров циклической трещиностойкости, так же используемой в модели, предложенной в работе [115] на основе эмпирических зависимостей из работ [56].

Экспериментальный коэффициент  $C$  и показатель степени  $n$  в уравнении Пэриса-Эрдогана количественно характеризуют сопротивление росту трещины в области средних скоростей ( $10^{95} < dl/dN < 10^{53}$  м/цикл). В этой области определения экспериментальных показателей проведено достаточно много исследований, которые показывают, что для большинства сталей показатель степени  $n=1... 10$ , а параметр  $C=10^{-25} ... 10^{-8}$ .

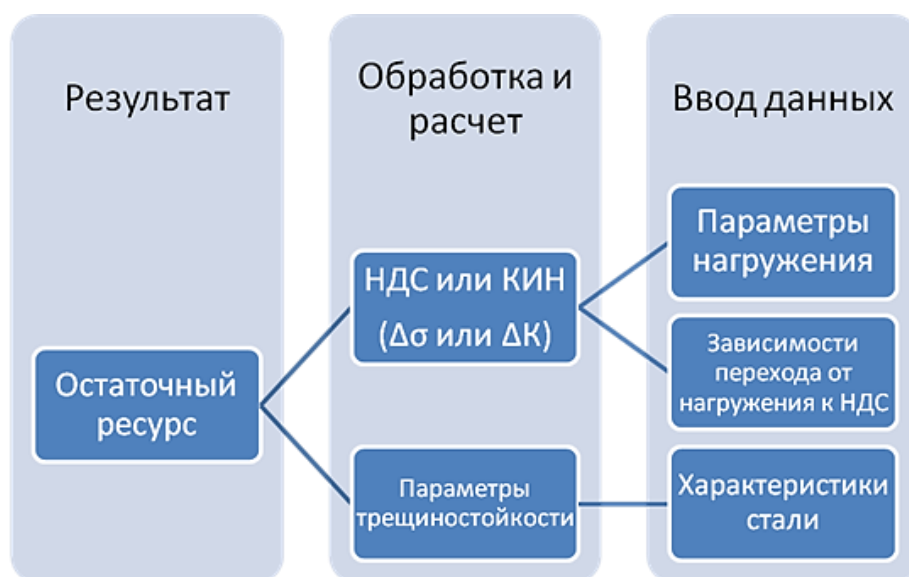


Рис. 3.18 - Общая схема определения остаточного ресурса

Определение эмпирических зависимостей параметров  $C$  и  $n$  проводили по методике, разработанной Ю.С. Бахрачевой [56], в соответствии с которой при допущении, что скорость распространения усталостной трещины пропорциональна размеру обратимой пластической зоны перед вершиной трещины, показатель  $n$  можно представить в виде зависимости:

$$n = \frac{\lg r_{fc} - \lg r_{th}}{\lg K_{fc} - \lg K_{th}}, \quad (3.15)$$

где  $r_{fc}$  – радиус обратимой пластической зоны, отвечающий величине  $K_{fc}$ ;

$r_{th}$  - радиус обратимой пластической зоны, отвечающий величине  $K_{th}$ ;

$K_{fc}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при циклическом нагружении;

$K_{th}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений.

Значения  $r_{fc}$  и  $r_{th}$  определяются из условий:

$$r_{fc}(t, K) = \frac{(1-2\mu)^2}{2\pi} \left( \frac{K_{fc}}{\sigma_T} \right)^2, \quad (3.16)$$

$$r_{th} = \frac{(1-2\mu)^2}{2\pi} \left( \frac{K_{th}}{\sigma_B} \right)^2, \quad (3.17)$$



В проведенных исследованиях [56] показано существование линейной зависимости между параметрами  $C$  и  $n$ , которая описывается соотношением:

$$C = (0,2 \cdot 10^{-3}) \exp^{-6,9048n}. \quad (3.18)$$

Исходя из этого, можно считать, что на линейном участке КДУР скорость распространения трещины определяется единым параметром.

Общая схема учета эмпирических формул для определения параметров уравнения Перриса-Эрдогана представлена на рис. 3.19.

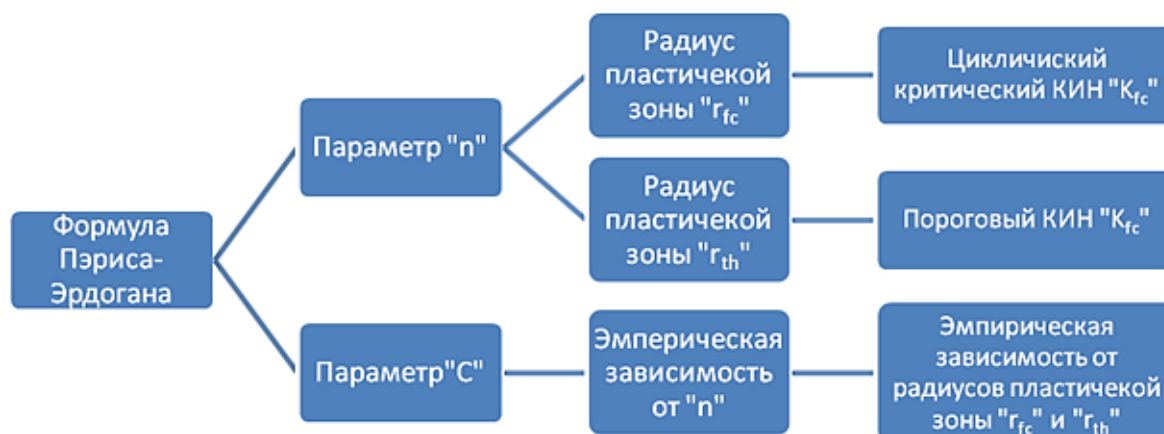


Рис. 3.19. Определение параметров уравнения Перриса-Эрдогана

Величина циклического критического КИН соответствует переходу от стабильного развития усталостной трещины к нестабильному. В работах представлено существование линейной эмпирической зависимости между критическим КИН  $K_{fc}$  и циклическим критическим КИН:

$$K_{fc} = 1,0801K_{IC} - 34,341. \quad (3.19)$$

На основании [40, 97-101, 106, 112] величину порогового КИН в зависимости от предела текучести и коэффициента асимметрии цикла определяем из выражения:

$$K_{th} = 12,7 - 0,006\sigma_T - [11,37 - 0,0065\sigma_T]R, \quad (3.20)$$

где  $R$  – коэффициент асимметрии цикла  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ;

$\sigma_{min}$  – напряжения от минимальной ветровой нагрузки блока и параметра, характеризующего фактический режим работы;

$\sigma_{max}$  – напряжения от максимальной ветровой нагрузки блока и параметра, характеризующего фактический режим работы.

В результате соотношение (3.10) с учетом соотношения (3.11) примет вид:

$$\frac{dl}{dN} = C (\Delta\sigma_{эКВ}(P, B, I) \cdot f_{IK}\sqrt{\pi l_0})^n. \quad (3.21)$$

Общее число циклов нагружения до достижения трещиной критического размера определяется по формуле:

$$N_{OP} = \sum_{i=1}^k (N_{P_i} + N_{И_i}), \quad (3.22)$$

где  $N_{P_i}$  – число циклов работы грейферной тележки;  
 $N_{И_i}$  – число циклов от инерционных воздействий.

Общий блок нагружения ездовых балок от технологических и инерционных воздействий представлен на рис. 3.20.

Для остановки процесса итерационного расчета необходимо определить критическую длину трещины, которая так же зависит от целого ряда факторов. Схема потока информационных вычислений представлена на рис. 3.21.

Так как в подавляющем большинстве случаев оценку трещиностойкости конструкций выполняется по критическому коэффициенту интенсивности напряжений в зависимости от критических значений температур вязко-хрупкого перехода. Условие, при котором статическая трещиностойкость конструкции обеспечивается, имеет вид:

$$K_I \leq K_{IC}, \quad (3.23)$$

где  $K_I$  - коэффициент интенсивности напряжений (КИН),  $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ ;  
 $K_{IC}$  - критический коэффициент интенсивности напряжений,  $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

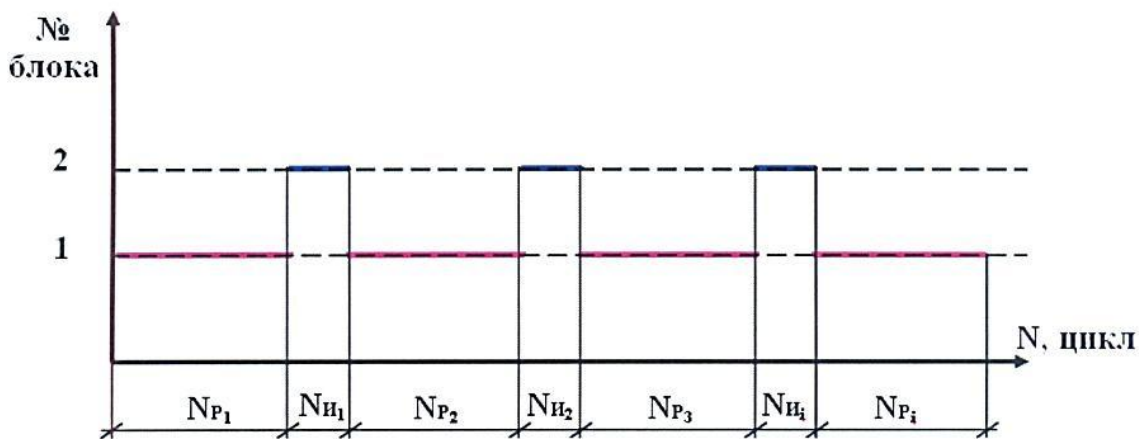


Рис. 3.20. Общий блок нагружения ездовых балок

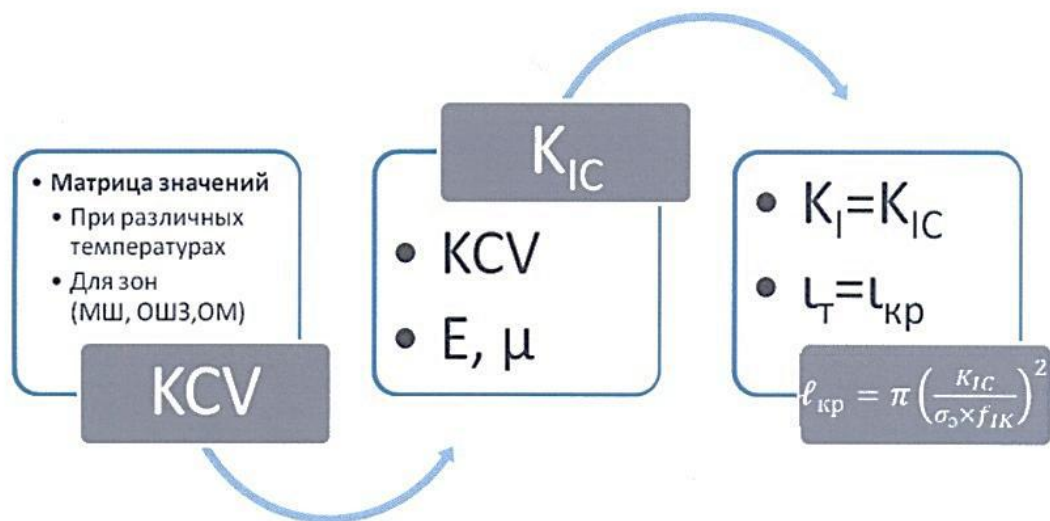


Рис. 3.21. Общая схема вычисления критической длины трещины

Учитывая относительную сложность испытаний по критериям механики разрушения, а также ограниченный объем исследуемого материала и широкий температурный диапазон испытаний, в дальнейшем оценка вязкости разрушения проведена, используя корреляционную зависимость, полученную В.С. Гиренко [122]. Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$  определяется по величине ударной вязкости KCV по формуле:

$$K_{IC} = \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} KCV}, \quad (3.24)$$

где  $KCV$  - значение ударной вязкости, МДж/м<sup>2</sup>;  
 $E$  - модуль упругости материала, МПа;  
 $M$  - коэффициент Пуассона.

Для определения граничного значения длины трещины на каждом этапе построения кинетической диаграммы усталостного разрушения, критическую длину трещины определяли из условия (3.24), приняв, что  $K_I = K_{IC}$ :

$$l_{кр} = \pi \left( \frac{K_{IC}}{\Delta\sigma_{эв} f_{1K}} \right)^2. \quad (3.25)$$

### 3.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЕЗДОВЫХ БАЛОК

Скорректированная математическая итерационная модель оценки остаточного ресурса до достижения трещиной критического размера с учетом инерционных воздействий, условий эксплуатации, режима нагружения и механической неоднородности материала состоит из следующих расчетных блоков (рис. 3.22):

1. *Исходные данные*: конструктивные характеристики и режим работы мостового перегружателя; климатические условия эксплуатации; механические характеристики материала; параметры начальных условий дефектов и повреждений.
2. *Расчетные блоки*: Порядок проведения расчета (выходные данные по результатам расчета каждого блока):
  - а) построение блока фактического режима работы;
  - б) расчет параметров блоков циклического нагружения:
    - генерирование случайного процесса ветрового нагружения в течение годового цикла (блок данных скоростей и пульсаций ветра по заданным ожиданиям скоростей и направлениям);
    - генерация технологического и инерционного блока нагружения в течение годового цикла;
    - переход от значений нагружения к значениям размаха напряжений и формирование циклического блока НДС;
  - в) расчет значений ударной вязкости при эксплуатационной температуре (построение функциональной зависимости значений ударной вязкости при температуре проведенных испытаний от эксплуатационного диапазона температур);
  - г) расчет критического КИН и критической длины трещины по характеристикам материала и параметрам циклического нагружения;
  - д) расчет параметров  $C$  и  $n$  уравнения Пэриса-Эрдогана на основе эмпирических зависимостей и получение функциональных зависимостей параметров от переменных (зоны материала с различными свойствами, параметры циклического нагружения и температурные условия).



Рис. 3.22. Блок-схема итерационного процесса расчета остаточного ресурса

### 3. Блок графического представления:

- а) непосредственно итерационное вычисление характеристик усталостного роста трещины до критической длины;
- б) построение кинетической диаграммы роста трещины.

Счеты по данной методике проведены с использованием математических прикладных программ (MathCAD и Excel).

На рис. 3.23, 3.24 представлены диаграммы роста усталостной трещины на примере расчета сварной неразрезной стальной несимметричной ездовой балки коробчатого сечения решетчатого мостового перегружателя.

Трещина горизонтальная  $\ell_0=10\text{мм}$ ,  $\ell_{\text{кон}}=901,004\text{ мм}$ ,  $T_{\text{экс}}=30\text{ мес}$ . Оценено влияние инерционных воздействий на остаточный ресурс ездовых балок мостовых перегружателей на стадии РУТ. В результате расчетов получили, что учет инерционных воздействий приводит к уменьшению остаточного ресурса до 30%.

Для проведения итерационного процесса математическая модель построена блочным способом, позволяющим на каждом этапе программирования задаваться своей моделью расчета, и при наличии данных по свойствам сталей (механические характеристики и параметры циклической и статической трещиностойкости), определенных экспериментальным путем, заменить блок построения эмпирических зависимостей по сталям на фактические, полученные по результатам испытаний. В данной модели можно также использовать и фактические (записанные) режимы нагружения, что представляет предложенную математическую модель как универсальный инструмент в решении задачи по определению остаточного ресурса конструкций с трещиноподобными дефектами и трещинами.

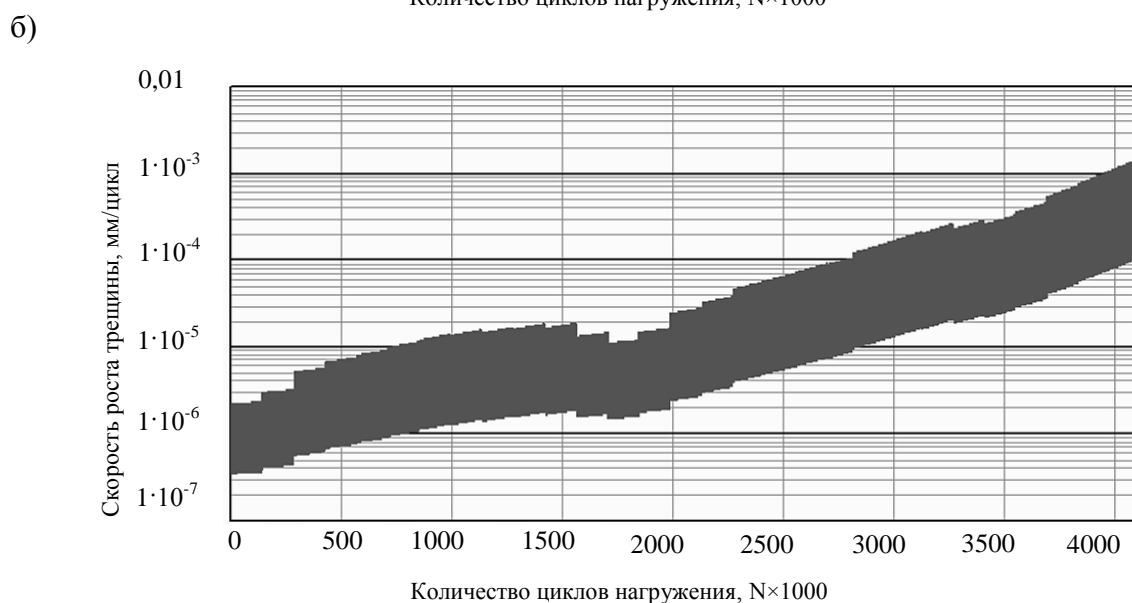
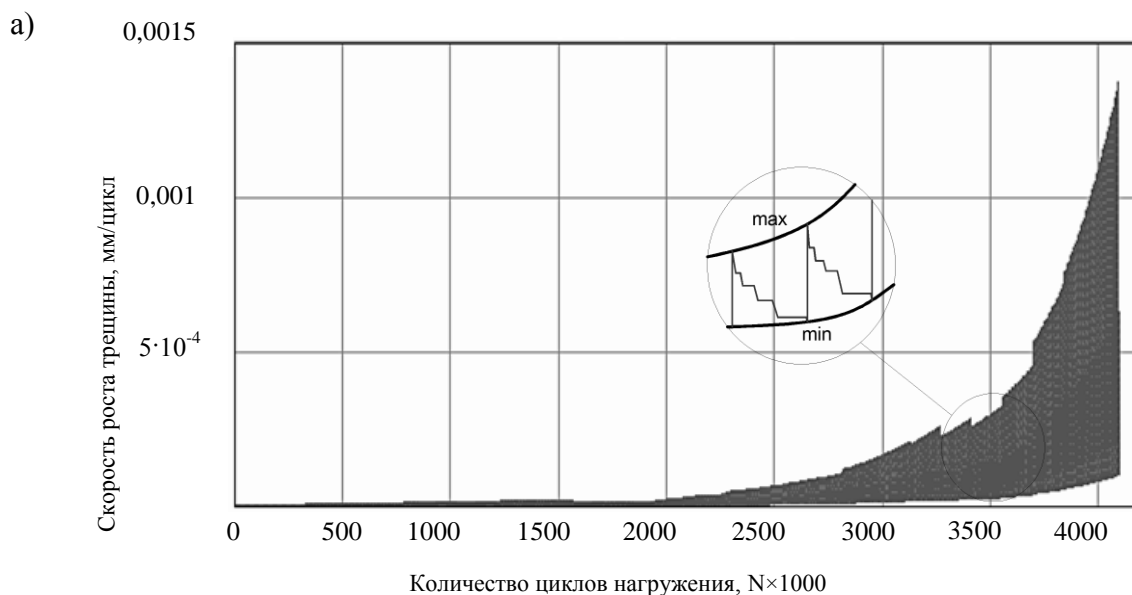


Рис. 3.23. Кинетические диаграммы роста усталостной трещины:  
а – в стандартной шкале координат; б – по оси ординат в логарифмической шкале координат



Рис. 3.24. Диаграммы роста усталостной трещины  
(периоды годовых колебаний скорости роста трещины)

#### **4.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОСТОВЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ НАКОПЛЕННЫХ ДЕФЕКТОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ**

##### *Геодезическая съемка подтележечных путей*

Необходимо проводить один раз в год геодезическую съемку подтележечных рельсов.

1. Наибольшая разность отметок по всей длине путей не должны превышать 100 мм. При нарушении нормальной эксплуатации дефект необходимо устранить.
2. Отклонение оси подтележечного рельса от прямой не должны превышать 20 мм на длине участка 40 м. При нарушении нормальной эксплуатации дефект необходимо устранить.
3. Смещение оси подтележечного рельса с оси ездовой балки не должно превышать 20 мм в каждую сторону. Дефект необходимо устранить, если в ездовых балках обнаружены повреждения.
4. Взаимное смещение торцов смежных подтележечных рельсов не должно превышать по высоте – 3 мм, плане – 3 мм. Дефект устранить заменой изношенных рельсов.
5. Зазоры в стенках подтележечных рельсов не должны превышать 2 мм. Дефект устранить при помощи рихтовки рельсов.

##### *Геодезическая съемка деформированного положения пролетного строения при характерных положениях тележки с грузом*

Рекомендуется проводить один раз в год замеры прогибов в характерных точках каждой балки коробчатого сечения, либо каждой главной фермы для мостовых перегружателей с решетчатыми конструкциями пролетных строений.

Замеры необходимо проводить:

1. Посередине пролета при установке тележки с грузом в средней части пролета и в крайнем положении на консоли со стороны жесткой опоры. Относительный прогиб не должен превышать  $1/700$  от длины пролета;
2. На конце консоли со стороны жесткой опоры при установке тележки с грузом в крайнем положении на этой консоли и средней части пролета. Относительный прогиб не должен превышать  $1/300$  от вылета консоли;
3. На конце консоли со стороны гибкой опоры при установке тележки с грузом в крайнем положении на этой консоли и в средней части пролета. Относительный прогиб не должен превышать  $1/300$  от вылета консоли.

В случае отклонения значений перемещений характерных точек в большую сторону на 20-30% по сравнению со средними показателями многолетних наблюдений, необходимо произвести обследование несущих металлических конструкций пролетного строения.

***Эксплуатационные требования к техническому состоянию колес тележки крана-перегрузателя***

1. Износ верхних и боковых граней подтележечного рельса (для рельсов типа КР 100 – КР 140) не должен превышать по высоте головки рельса 10 мм, а по ширине – 15 мм. Повреждение устранить путем замены рельсов;
2. Разность расстояния между вертикальными осями колес передней и задней колесных пар (ширина колес) не должна превышать 5 мм;
3. Неравномерность давления колес тележки на одной стороне  $(P_1 - P_2)/P_1$  не должна превышать 0,15;
4. Разность диаметров ведущих колес тележки не должна превышать 2 мм, разность диаметров колес, расположенных на одной стороне тележки не должна превышать 2 мм;
5. Угол перекоса колеса тележки по отношению к оси подтележечного рельса не должен превышать 1/750;
6. Износ реборды колеса (по толщине) не должен превышать 0,3 номинальной толщины реборды.

***Эксплуатационные требования к техническому состоянию ездовых балок мостовых перегружателей с решетчатой конструкцией пролетного строения***

1. Разность отметок поясов ездовых балок в одном поперечном разрезе не должна превышать на опорах 10 мм, в пролете – 15 мм. Дефект устраняется установкой прокладок, если затруднена эксплуатация крана-перегрузателя;
2. Смещение осей ездовых балок с разбивочной оси не должно превышать 4 мм. Дефект устранить путем рихтовки ездовых балок, если затруднена эксплуатация крана-перегрузателя;
3. Перекос полок элементов двутаврового сечения в местах примыкания элементов не должен превышать 0,01 ширины полок, в прочих местах – 0,02 ширины полок;
4. Выпучивание стенки балки сплошного сечения не должно превышать 0,01 ее высоты;
5. Местные погибы не должны превышать 0,2 толщины элементов.

***Требования к режимам эксплуатации мостовых перегружателей***

1. Располагать грейферную тележку при передвижении мостового перегружателя в одном из трех положений:
  - на гибкой опоре (наиблагоприятнейшее расположение);
  - в середине пролета;
  - на жесткой опоре.
2. Не располагать грейферную тележку при передвижении мостового перегружателя на консолях.
3. Не передвигать мостовой перегружатель во время работы грейферной тележки.
4. Передвижение мостового перегружателя выполнять строго с порожним грейфером.

***Рекомендации по обследованию несущих конструкций пролетных строений кранов-перегрузателей***

Для мостовых перегружателей с решетчатой системой пролетного строения необходимо производить осмотр следующих конструкций:

1. Ездовых балок – в средней части пролета и у жесткой опоры со стороны консольной части и со стороны пролета;
2. Узлов крепления ездовых балок к узлам главных ферм на протяжении всего пролетного строения.

Для мостовых перегружателей с комбинированной системой пролетного строения необходимо производить осмотр следующих конструкций:

1. Сварных швов выполненных ранее усиления;
2. Трещин в стенках, ограниченных отверстиями;
3. Крепление сварными швами наклонных ламелей к верхнему поясу и стенке балок коробчатого сечения;
4. Осмотр креплений ребер жесткости и диафрагм к стенкам и поясам производить при частичных и полных освидетельствованиях кранов-перегружателей.

***Рекомендации по обеспечению эксплуатационной пригодности ездовых балок и узлов их крепления***

Необходимо устранить трещины в швах крепления наклонных ламелей к стенкам и поясам и произвести усиление наклонных ламелей в следующем порядке:

- определить границы трещины;
- трещину вырубить по всей длине;
- заварить трещину;
- сварные швы заваренных трещин зачистить;
- приварить наклонную ламель из гнутого листа (рис. 3.25).

Крепление ребер жесткости к диафрагмам осуществить посредством уголка-коротыша приваренного пером к ребру жесткости продольным (фланговым) швом.

Неудовлетворительным является конструктивное решение узлов креплений ребер жесткости к диафрагмам, что привело к массовым повреждениям этих узлов.

В качестве варианта усиления уголков крепления диафрагм возможна их замена на уголки большей длины и большего поперечного сечения из пластичных сталей ВСтЗсп либо 09Г2С с креплением на высокопрочных болтах. При этом кромки уголков должны быть подвергнуты механической обработке для устранения возможных очагов зарождения усталостных трещин, которыми являются дефекты газовой резки.

В случае замены соединительных уголков крепления диафрагм необходимо выполнить обследование усиленных узлов по истечению одного месяца эксплуатации.

В дальнейшем обследования уголков крепления диафрагм рекомендуется проводить одновременно с ездовыми балками.

Период между обследованиями ездовых балок и узлов крепления диафрагм должен быть в 2-3 раза меньше по сравнению с периодом обследования моста перегружателя.

Варианты усиления ездовых балок коробчатого сечения мостовых перегружателей №4, №5, №6 КХП ОАО «ММК» представлены на рис. 3.26, 3.27.



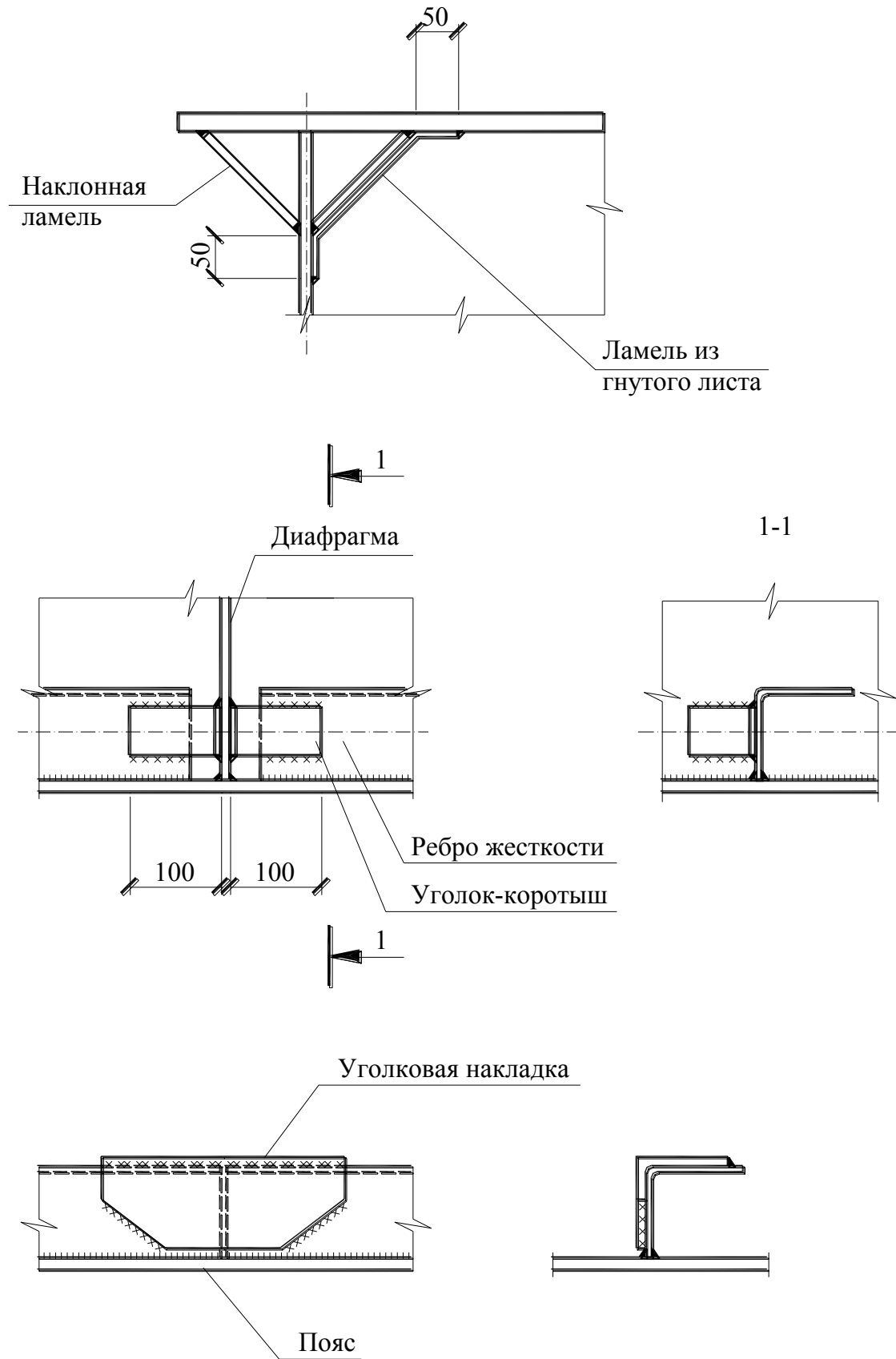


Рис. 3.25. Варианты устранения повреждений элементов и их соединений балок коробчатого сечения мостовых перегружателей №4, №5, №6 КХП ОАО «ММК»

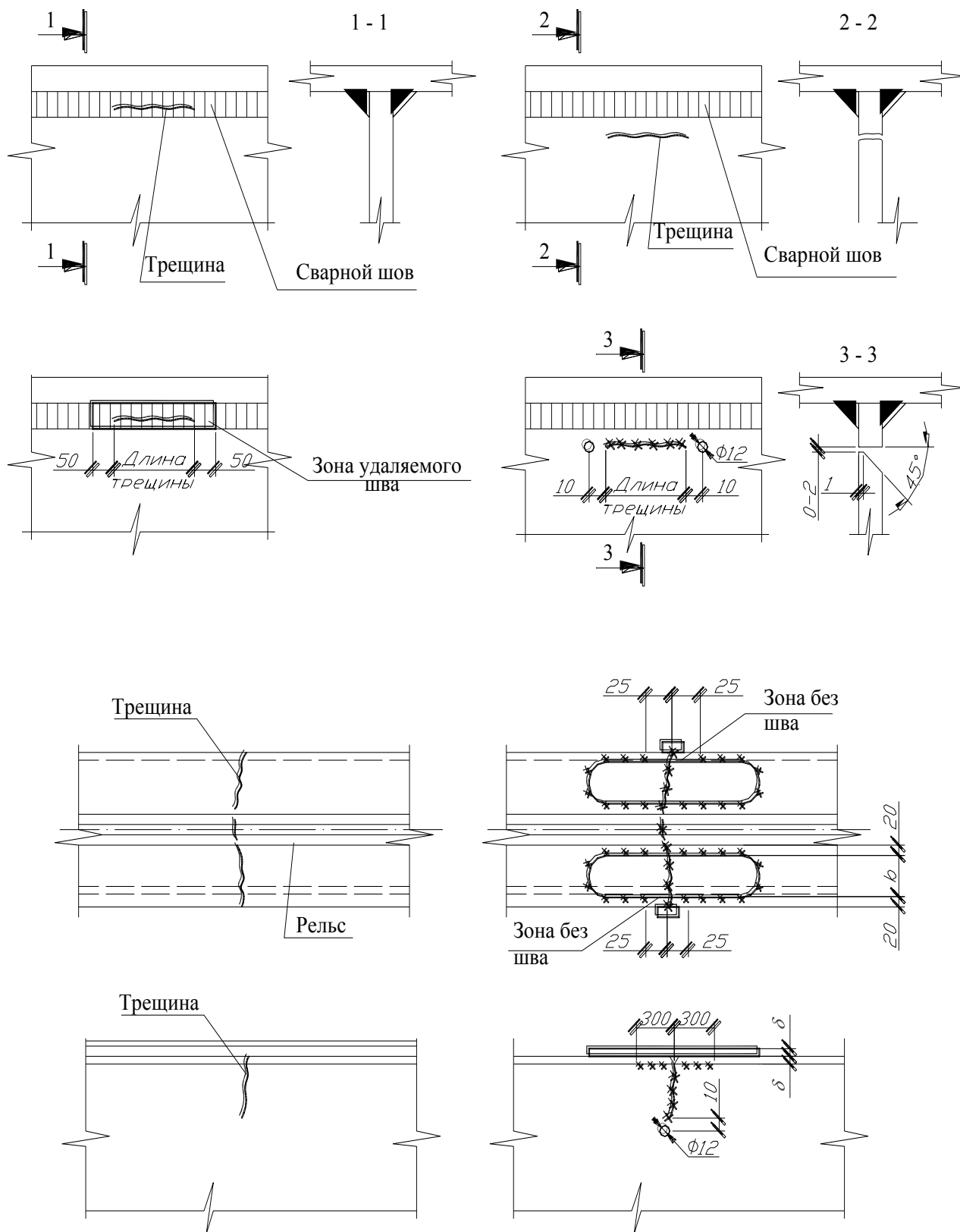


Рис. 3.26. Варианты усиления ездовых балок коробчатого сечения мостовых перегружателей №4, №5, №6 КХП ОАО «ММК»

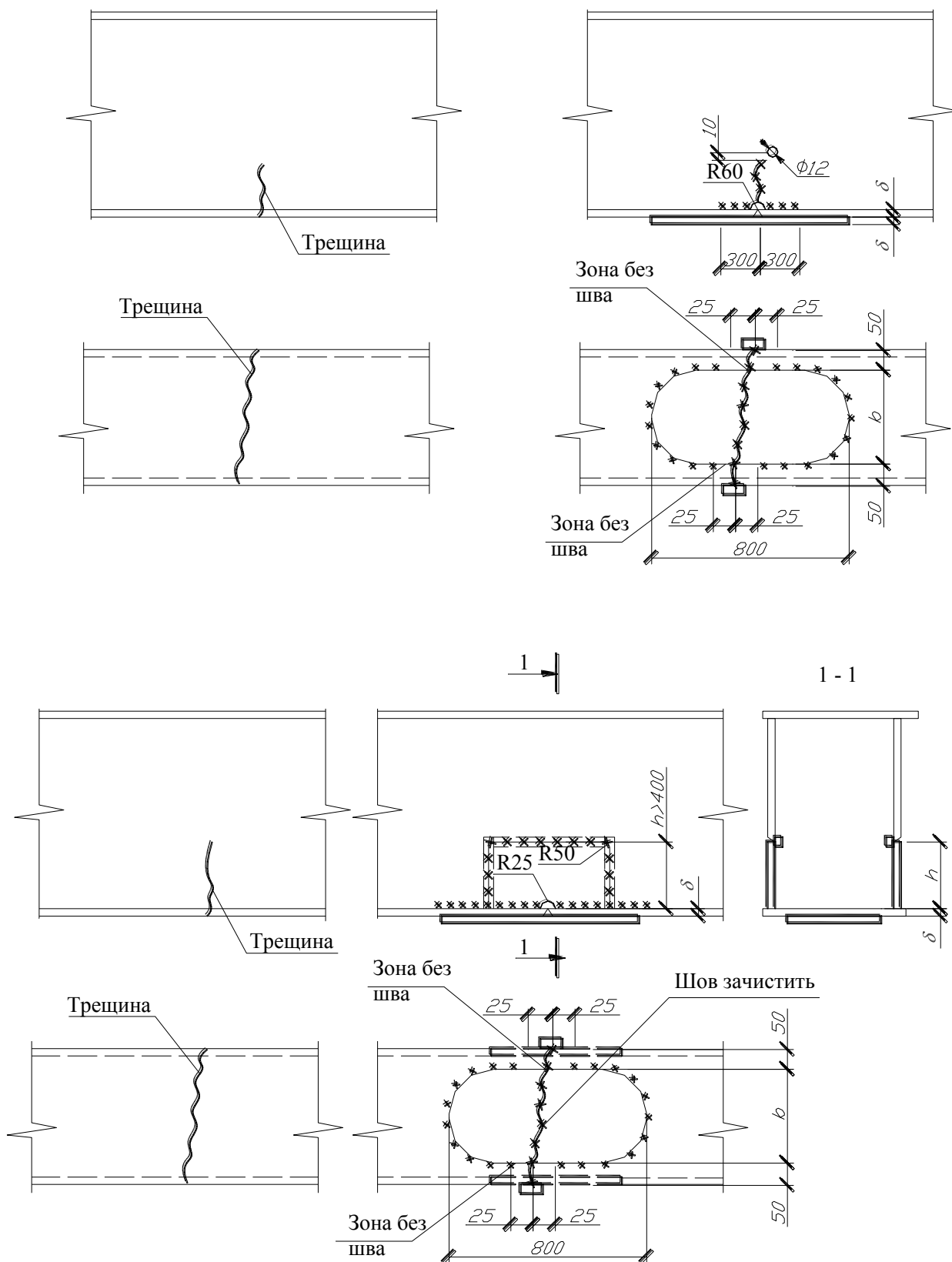


Рис. 3.27. Варианты усиления ездовых балок коробчатого сечения мостовых перегружателей №4, №5, №6 КХП ОАО «ММК»

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беглов, Б.В. Мостовые перегружатели [Текст] / Б.В. Беглов, П.Л. Кох, В.И. Онищенко и др. – М.: Машиностроение, 1974. – 224 с.
2. Абрамович, И.И. Некоторые особенности эксплуатации и ремонта металлических конструкций мостовых перегружателей [Текст] / И.И. Абрамович, С.О. Кульбачный, Е.П. Лебедев, А.С. Патрашов // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – №11. – Библиогр.: с. 8-10.
3. Абрамович, И.И. Козловые краны общего назначения [Текст] / И.И. Абрамович, Г.А. Котельников. – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.
4. Александров, М.Л. Грузоподъемные машины [Текст]. – М.: Высшая школа, 2000. – 552 с.
5. Брауде, В.Л. Справочник по кранам [Текст] / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.
6. Гохберг, М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин [Текст]. – 3-е изд., перераб. и доп. [Текст] – Л.: Машиностроение, 1976. – 455 с.
7. Джигкаев, Т.С. Основы динамики мостовых перегружателей, кранов и их защита от ударов при наезде тележек на упоры [Текст]: автореф. дис.... д-ра. техн. наук: 05.05.04 / Джигкаев Тамерлан Сосланович. – Новочеркасск, 2001. – 44 с.
8. Кобзев, Р.А. Оценка и повышение безопасности эксплуатации и особенности определения остаточного ресурса козловых кранов для обслуживания гидроэлектростанций [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.05.04 / Кобзев Роман Анатольевич. – Саратов, 2004. – 175 с. — Библиогр.: с. 21-39.
9. Нащекин, М.В. Действительная работа стальных неразрезных циклически нагруженных балок [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05 73 01 / Нащекин Максим Валерьевич. – Магнитогорск, 2001. – 179 с.
10. Александров, М.Л. Справочник по кранам [Текст]: в 2 т. / М.Л. Александров, М.М. Гохберг, А. А. Ковин и др.; под общ. ред. М.М. Гохберга. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. – 2 т.
11. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций [Текст]. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
12. Ботвина, Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физике и механики разрушения [Текст] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – №4. – Библиогр.: с. 41-51.
13. Еремин, К.И. Изучение действительной работы циклически нагруженных строительных металлоконструкций: монография [Текст] / К.И. Еремин, С.А. Ницета, М.В. Нащекин. – Магнитогорск: МГМА, 1996. – 228 с.
14. Михайлов, Г.Г. Некоторые аспекты стратегии определения остаточного ресурса [Текст] / Г.Г. Михайлов, О.А. Конаков, А.Я. Колмаков // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №1. – Библиогр.: с. 44-45.
15. Воронцов, Г.А. Атмосферная коррозия металлоконструкций подъемно-транспортных машин и оборудования [Текст] / Г.А. Воронцов, Г.А. Плеханов // Исследование крановых металлоконструкций и механизмов: сб. научн. тр. – М.: ВНИИПТМАШ, 1982. – Библиогр.: с. 32-43.
16. Петров, Л.Н. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов [Текст] / Л.Н. Петров, Н.Г. Сопрунюк; под ред. Р.К. Мелехова. – Киев: Наукова думка, 1991. – 216 с.
17. Горицкий, В.М. Диагностика металлов [Текст] / В.М. Горицкий. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.
18. Аварии и катастрофы [Текст]. Кн. 4 / Под ред. В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М.: АСВ, 1998. – 203 с.
19. Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций [Текст] / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. – М.: Стройиздат, 1978. – 182 с.

20. Металлические конструкции [Текст]: в 3 т. Общая часть. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата гос. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). – М.: АСВ, 1998. – Т. 1. – 576 с.
21. Металлические конструкции [Текст]: в 3 т. Стальные конструкции зданий и сооружений (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата гос. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). – М.: АСВ, 1998. – Т. 2 – 512 с.
22. ОХМК. Доменный цех. Оценка технического состояния металлических конструкций крана-перегрузателя №1. Анализ напряженно деформированного состояния элементов [Текст]: отчет о НИР/ МГМИ. – Магнитогорск, 1991. – 52 с.
23. Оценка технического состояния металлоконструкций угольного крана-перегрузателя. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций крана [Текст]: отчет о НИР / МГМИ. – Магнитогорск, 1990 – 44 с.
24. Скляднев, А.И. Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок [Текст] / А.И. Скляднев, В.В. Сердюк // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №11. – Библиогр.: с. 34-36.
25. Оценка остаточного ресурса грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы [Текст]: методические указания ЗЛЮ «Уральский экспертный». – Екатеринбург, 2002. – 27 с.
26. РД 10-112-07. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Ч. 5. Краны мостовые и козловые [Текст]: утв. Госгортехнадзором России. – М. – 54 с.
27. РД 24-112-5Р. Руководящий документ по оценке остаточного ресурса кранов мостового типа (Текст): утв. Госгортехнадзором России. – М., 2002. – 24 с.
28. Брауде, В.И. Надежность подъемно-транспортных машин [Текст] / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 183 с.
29. Еремин, К.И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами [Текст]: дис.... д-ра. техн. наук. 05.23.01 / Еремин Константин Иванович. – М., 1996. – 418 с.
30. Еремин, К.И. Ресурс фланцевых соединений при наличии трещиноподобных дефектов сварки [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / Еремин Константин Иванович. – М., 1986. – 206 с.
31. Котельников, В.С. Концепции оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы [Текст] / В.С. Котельников, Ю.А. Еремин, А.А. Зарецкий, А.А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. – 2000. – JNs 10. – Библиогр.: с. 41 - 44.
32. Еремин, К.И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлических конструкций, имеющих трещиноподобные дефекты [Текст] / К.И. Еремин, С.А. Нишета, М.Б. Пермяков, М.В. Нащекин // Проблемы эксплуатации и оценка технического состояния строительных промышленных фондов, отработавших установленные сроки: науч.-инф. сб. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001. – Библиогр.: с. 41 - 42.
33. Петров, В.А. Кинетический подход к проблеме прогнозирования долговечности и остаточного ресурса конструкций [Текст] / В.А. Петров, Ю.В. Волков // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности металлических конструкций и методы их решения: тр. 1-й междунар. конф. – СПб., 1995. – Библиогр.: с. 191-193.
34. Труфанова, Т.В. Расчет долговечности деталей с макротрещинами при циклическом нагружении [Текст] / Т.Н. Труфанова // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности металлических конструкций и методы их решения: тр. 1-й междунар. конф. – СПб., 1995. – Библиогр.: с. 226-227.

35. Те, В.М. Прогнозирование остаточного ресурса металлических конструкций мостовых кранов [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.05.05 / Те Виктор Михайлович. – СПб., 2000. – 145 с.
36. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. Нормы проектирования [Текст]: – М.: Стройиздат, 1995.
37. Злочевский, А.Б. Долговечность элементов металлических конструкций в связи с кинетикой усталостного разрушения [Текст]: дис.... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Злочевский Анатолий Борисович – М., 1985. – 383 с.
38. Lawrence, F.U. Fatigue crack initiation and propagation in high-yield-strength steel weld metal / F.U. Lawrence, I.B. Radzimirski // *Welding Journal*. – 1970. – №10. – P. 31-36.
39. Smith, I.F. Defect and crack shape development in welded joints / I.F. Smith, R.A. Smith // *Fatigue of engineering materials and structures*. – 1982. – Vol. 5. – №2. – P. 151-165.
40. Броек, Д. Основы механики разрушения [Текст] / Д. Броек; пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
41. Воронецкий, А.Е. Влияние низких температур эксплуатации на усталостный ресурс сварных соединений с исходными дефектами [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / А.Е. Воронецкий. – М., 1984. – 22 с.
42. Кадзуо Хонда. Распространение трещин в областях растягивающих и сжимающих остаточных напряжений [Текст] / Хонда Кадзуо // *Дзайре*. – 1980. – Т. 29. – №325. – Библиогр.: с. 1029-1034.
43. Коцаньда, С. Усталостное разрушение металлов [Текст] / С. Коцаньда. – М.: Металлургия, 1976. – 455 с.
44. Chang, J. Prediction of fatigue crack growth at cold-worked fastener holes. – *Journal of aircraft*. – V.14. – №9. – P. 903-908.
45. Glinca, G. Teoretyscsna i eksperymentalna analiza wzrostu szczelin zmeczeniowych w obecności spawalniczych naprzezen własnych. - *Mechanika teoretyczna i Stosowana*, 1979. – V.4. – №17. – P. 479-495.
46. Соколов, С.А. Методологические основы прогнозирования долговечности металлических конструкций грузоподъемных машин [Текст]: дис.... д-ра техн. наук: 05.05.05 / Соколов Сергей Алексеевич – СПб., 1995. – 392 с.
47. Каминский, Л.С. Повышение безопасности эксплуатации стреловых кранов на основе регистрации и анализа их рабочих параметров [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / Л.С. Каминский. – Новочеркасск, 2001. – 23 с.
48. Ким, И.В. Комплексная оценка долговечности сварных разрезных подкрановых балок стохастическими и нейросетевыми методами [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ким Игорь Владимирович. – Магнитогорск, 2005. – 170 с.
49. Демыгин, Н.Е. Торможение хрупкого разрушения в сварных листовых конструкциях [Текст] / Н.Е. Демыгин // *Исследование хрупкой прочности строительных металлических конструкций*: тр. института. – М.: ЦНИИПСК, 1982. – Библиогр.: с. 31-42.
50. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов [Текст] / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
51. Определение характеристик статической и циклической трещиностойкости толстолистовой стали 09Г2С при повышенных температурах [Текст]: отчет о НИР / ЦНИИТ-МАШ. – М., 2002. – 54 с.
52. Баско, Е.М. Трещиностойкость сталей, перспективных для металлоконструкций, эксплуатируемых при повышенных температурах [Текст] / Е.М. Баско, В.М. Горицкий, Г.Р. Шнейдеров и др. // *Разработка и исследование стали для строительных конструкций*: тр. института. – М.: ЦНИИПСК, 1988. – Библиогр.: с. 127-142.
53. Тылкин, М.А. Структура и свойства строительной стали [Текст] / М.А. Тылкин, В.И. Большаков, П.Д. Одесский. – М.: Металлургия, 1983. – 287 с.
54. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов [Текст]. Ч. 1. Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман – М.: Машиностроение, 1974. – 161 с.

55. Москвичев, В.В. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем [Текст] / В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, А.П. Черняев и др. – Новосибирск: Наука, 2002. – 334 с.
56. Бахрачева, Ю.С. Оперативная оценка склонности материалов к хрупкому разрушению при статическом и циклическом нагружении [Текст]: дис... канд. техн. наук: 01.02.04 / Бахрачева Юлия Сагидуллоевна. – Великий Новгород, 2004. – 126 с.
57. Георгиев, М.Н. Влияние температуры на сопротивление развитию усталостных трещин в сталях СтЗсп, 18Гпс и 09Г2С [Текст] / М.Н. Георгиев, В.Н. Данилов, Н.Я. Межова и др. // Проблемы прочности. – №5. – Библиогр.: с. 45-50.
58. Георгиев, М.Н. Распространение коротких усталостных трещин [Текст] / М.Н. Георгиев, Н.Я. Межова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – №3. – Библиогр.: с. 55-58.
59. Добровольский, В.И. Определение параметров механики разрушения материала при длительном нагружении [Текст] / В.И. Добровольский, С.В. Добровольский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – №6. – Библиогр.: с. 47-55.
60. Добровольский, В.И. Распространение критериев трещиностойкости на сложное напряженное состояние [Текст] / В.И. Добровольский, С.В. Добровольский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – №7. – Библиогр.: с. 44-50.
61. Коновалов, Н.Н. Технологические требования к нормированию сварочных дефектов [Текст] / Н.Н. Коновалов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №10. – Библиогр.: с. 30-32.
62. Коновалов, Н.Н. Методы оценки норм допустимости дефектов в сварных соединениях грузоподъемных машин [Текст] / Н.Н. Коновалов // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – №12. – Библиогр.: с. 27-32.
63. Макаров, Р.А. Методы обнаружения и мониторинга развития трещин в строительных конструкциях [Текст] / Р.А. Макаров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – №6. – Библиогр.: с. 26-27.
64. Лужин, О.В. Обследование и испытание сооружений [Текст] / О.В. Лужин, А.Б. Злочевский, И.А., Горбунов, В.А. Волохов. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
65. Троицкий, В.А. Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения [Текст] / В.А. Троицкий, В.П. Радько, В.Г. Демиденко. – Киев: Вища шк., 1983. – 154 с.
66. Злочевский, А.Б. Экспериментальные методы в строительной механике [Текст] / А.Б. Злочевский. – М.: Стройиздат, 1983. – 138 с.
67. Мэнли, Р. Анализ и обработка записей колебаний [Текст] / Р. Мэнли. – М.: Машиностроение, 1972. – 78 с.
68. Боровиков, В. STATISTIKA. Искусство анализа данных на компьютере [Текст] / В. Боровиков. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
69. Румшицкий, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст]: справ, руковод. / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
70. Пискунов, В.Г. Расчет крановых конструкций методом конечных элементов [Текст] / В.Г. Пискунов, И.М. Бузун, А.С. Городецкий. – М.: Машиностроение, 1991. – 238 с.
71. Программный комплекс для расчета пространственных конструкций на прочность, устойчивость и колебания STARK\_ES. [Текст]: руковод. пользователя. – М.: «Copyright EuroSoft (Еврософт)», 2006. – 376 с.
72. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий [Текст] – М.: Стройиздат, 1985.
73. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия [Текст] — М.: Стройиздат, 2002.
74. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика [Текст] – М.: Стройиздат, 1982.
75. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология [Текст] – М.: Стройиздат, 1999.
76. ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъемные. Нагрузка ветровая. Нормы и метод определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 16 с.

77. Савицкий, Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения [Текст] / Г.А. Савицкий. – М.: Изд-во лит. по стр., 1972. – 110 с.
78. Шкворченко, З.А. Инженерная методика расчета ветровых нагрузок на козловые краны [Текст] / З.А. Шкворченко // Исследование крановых металлоконструкций и механизмов: сб. научн. тр. – М.: ВНИИПТМАШ, 1981. – Библиогр.: с. 26-34.
79. Макаров, Е.Г. Сопротивление материалов на базе Mathcad. [Текст] / Е.Г. Макаров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.
80. Алямовский, А.А. Инженерный анализ методом конечных элементов. [Текст] / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
81. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений [Текст] / Р. Петерсон; пер. с англ. И.А. Нечая, И.П. Сухарева, Б.Н. Ушакова. – М.: Издательство «Мир», 1977. – 302 с.
82. Нежданов, К.К. Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчета [Текст]: дис.... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Нежданов Кирилл Константинович. – М., 1993. – 307 с.
83. Мюнзе, В.Х. Усталостная прочность сварных стальных конструкций [Текст] / В.Х. Мюнзе; перевод с англ.; под ред. С.В. Серенсена, В.И. Труфякова. – Нью-Йорк, 1964. – М.: Машиностроение. 1968 – 272 с.
84. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность [Текст] / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975 – 488 с.
85. Труфяков, В.И. Усталость сварных соединений [Текст] / В.И. Труфяков. – Киев: Наукова думка, 1973. – 216 с.
86. Форрест, П. Усталость металлов [Текст] / П. Форрест; перевод с англ.; под ред. С.В. Серенсена. – Оксфорд, Лондон, Нью-Йорк, Париж, 1962. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
87. Тимошенко, С.П. Теория упругости [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер; перевод с англ.; под ред. Г.С. Шапиро – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
88. Афанасьев, Н.Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов [Текст] / Н.Н. Афанасьев. – Киев, 1953. – 128 с.
89. Хэйвуд, Р.Б. Проектирование с учетом усталости [Текст] / Р.Б. Хэйвуд; перевод с англ.; под ред. И.Ф. Образцова. – Лондон, 1962. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
90. Одинг, И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов [Текст] / И.А. Одинг. – М.: Машгиз, 1962. – 260 с.
91. Арутюнян, Р.А. Проблема усталости и вероятностные методы ее решения [Текст] / Р.А. Арутюнян // Вестник РФФИ (приложение к «Информационному бюллетеню РФФИ» №14) – 2006. – №2.
92. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности [Текст] / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев; под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.
93. Голуб, В.П. Методика построения диаграмм предельных напряжений при асимметричном многоцикловом нагружении [Текст] / В.П. Голуб, Е.С. Кочеткова, А.Д. Погребняк // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – №1. – Библиогр.: с. 42-48.
94. Дмитриев, А.Н. Проблемы определения ресурса грузоподъемных кранов [Текст] / А.Н. Дмитриев, Ю.И. Калинин // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – №2. – Библиогр.: с. 54-56.
95. Емельянов, О.В. Прогнозирование остаточного ресурса циклически нагружаемых решетчатых конструкций [Текст] / О.В. Емельянов, А.Н. Шувалов // Градостроительство, прогрессивные строительные конструкции, технологии, инженерные системы: межвуз. сб. научн. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 176 с.
96. Иванова, В.С. Усталостное разрушение [Текст] / В.С. Иванова. – М.: Металлургиздат, 1963. – 272 с.
97. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: Справочник [Текст] / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.



98. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / В.П. Когаев; под ред. А.П. Гусенкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.
99. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность [Текст] / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
100. Махутов, Н.А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов [Текст] / Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – №4. – Библиогр.: с. 37-41.
101. Махутов, Н.А. Исследования нелинейных эффектов деформирования и критериев разрушения [Текст] / Н.А. Махутов., М.М. Гаденин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – №8. – Библиогр.: с. 57-67.
102. Махутов, НА. Механика малоциклового разрушения [Текст] / Н.А. Махутов, М.И. Бурак, М.М. Гаденин и др. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
103. Митенков, Ф.М. Определение и обоснование остаточного ресурса машиностроительных конструкций при долговременной эксплуатации [Текст] / Ф.М. Митенков, Ю.Г. Коротких, Г.Ф. Городов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – №1. – Библиогр.: с. 5-13.
104. Мэнсон, С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость [Текст] / С. Мэнсон. – М.: Машиностроение, 1974. – 129 с.
105. Негода, Е.Н. Расчет многоциклового выносливости сварных соединений [Текст] / Е.Н. Негода // Сварочное производство. – 2006. – №1. – Библиогр.: с. 3-6.
106. Нотт, Дж.Ф. Основы механики разрушения [Текст] / Дж.Ф. Нотт. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
107. Коротких, Ю.Г. Оценка остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов [Текст] / Ю.Г. Коротких, Г.Ф. Городов, В.А. Панов и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – №12. – Библиогр.: с. 27-29.
108. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения [Текст] / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
109. Кикин, А.И. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий [Текст] / А.И. Кикин, А.А. Васильев, Б.Н. Кошутин и др. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 301 с.
110. Потапова, Л.Б. Критерии равной вероятности разрушения для оценки прочности материалов при сложном напряженном состоянии [Текст] / Л.Б. Потапова, В.П. Ярцев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – №10. – Библиогр.: с. 39-46.
111. Розенштейн, И.М. Особенности хрупкого разрушения сварных стальных конструкций [Текст] / И.М. Розенштейн // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – №3. – Библиогр.: с. 53-57.
112. Хеллан, К. Введение в механику разрушения [Текст] / К. Хеллан; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
113. Худошин, А.А. Оценка остаточного ресурса металла оборудования, работающего при статической нагрузке [Текст] / А.А. Худошин, В.А. Зимица, О.И. Кузнецов // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – №5. – Библиогр.: с. 29-30.
114. Шанявский, А.А. Прогнозирование развития усталостных повреждений элементов конструкций авиатехники при сложном напряженном состоянии [Текст] / А.А. Шанявский, Е.Ф. Орлов, К.З. Караев. – М.: НТИЦ гражд. авиации, 1992. – 78 с.
115. Шаповал, Д.В. Долговечность стволы металлических дымовых труб с трещиноподобными дефектами [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / Шаповал Дмитрий Викторович. – Магнитогорск, 2006. – 120 с.
116. Шевнин, В.М. Оценка остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов [Текст] / В.М. Шевнин, Ю.М. Гофман // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – №10. – Библиогр.: с. 30-31.

117. Арушонок, Ю.Ю. Усталостная долговечность металлических конструкций при стационарных случайных воздействиях [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / Арушонок Юрий Юрьевич. – М, 1993. – 28 с.
118. Майстренко, И.Ю. Оценка остаточного ресурса эксплуатируемых стальных конструкций [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.23.01 / Майстренко Игорь Юрьевич. – Казань, 2006. – 232 с.
119. Островский, А.В. Усталостная долговечность элементов металлических конструкций с учетом развития и взаимодействия трещин [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / Островский Андрей Владимирович. – М, 1990. – 20 с.
120. Степнов, М.Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости при асимметричном цикле напряжений [Текст] / М.Н. Степнов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – №8. – Библиогр.: с. 50-57.
121. Бернгардт, Р.П. Климатическое обобщение и применение информации о ветре и гололеде [Текст]: дис.... д-ра техн. наук: 25.00.30 / Бернгардт Роберт Павлович. – Южно-Сахалинск, 2003. – 180 с.
122. Гиренко, В.С. Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений [Текст] / В.С. Гиренко, Э.В. Котенков // Автоматическая сварка. – 1985. – №9. – Библиогр.: с. 13-20.
123. Солодарь, М.Б. Металлические конструкции для строительства на севере [Текст] / М.Б. Солодарь, Ю.С. Плишкин, М.В. Кузнецова – Л.: Стройиздат, 1981. – 208 с.
124. Шишков, Н.А. Надежность и безопасность грузоподъемных машин [Текст] / Н.А. Шишков – М.: Недра, 1990 г. – 252 с.
125. Тетельман, А. Применение анализа риска к исследованию хрупкого разрушения и усталости стальных конструкций [Текст] / А. Тетельман, П. Безунер // Механика разрушения. Разрушение конструкций. – М.: Мир, 1980. – С. 7-31.
126. Еремин, К.И. Повышение ресурса пролетных строений транспортерных галерей [Текст] / К.И. Еремин, Нищета С.А., Ильина О.Ю. // Дефектоскопия. 1998. – №6. – С. 102-106.
127. Руководство по проектированию транспортерных галерей [Текст]. – М.: Стройиздат, 1979.
128. Васильева, Л.С. Действительная работа стальных стропильных ферм с учетом дефектов и повреждений [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук./ Васильева Людмила Сергеевна. – Новосибирск, 1998. – 18 с.
129. Исправление дефектов сварки: Руководящие материалы [Текст]. – М.: ЦНИИ по машиностроению, 1974. – 64 с.
130. РТМ-1С-73: Руководящие технические материалы по сварке при монтаже тепловых электростанций [Текст]. – М.: Энергия, 1975. – 272 с.
131. Волченко, В.Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов. [Текст] / В.Н. Волченко – М.: Стандарты, 1974. – 160 с.
132. Демиденко, В.Г. Количественная оценка дефектности сварных соединений [Текст] / В.Г. Демиденко – Киев: Вища шк., 1978. – 23 с.
133. Жиденко, Г.Л. Диагностика трещинообразования в процессе сварки [Текст] / Г.Л. Жиденко // Автоматическая сварка. – 1981. – №9. – С. 16-18.
134. Гололобов, Б.А. Статистические принципы определения требований на допустимые размеры технологических дефектов сварки [Текст] / Б.А. Гололобов, А.Я. Артемьев// Выбор и обоснование методов и норм контроля качества соединений. – Л.: ЛДНТП, 1976. – С. 15-20.
135. Вопросы нормирования технологических дефектов сварных соединений сосудов высокого давления [Текст] / Г.П. Карзов, Б.Т. Тимофеев, В.П. Леонов и др. – Л.: ЛДНТП, 1974. – 35 с.
136. Карзов, Г.П. Новый подход к оценке качества сварных соединений [Текст] / Г.П. Карзов, В.П. Леонов, Б.Т. Тимофеев – Л.: ЛДНТП, 1978. – 26 с.

137. Контроль качества сварки [Текст] / ред. В.Н. Волченко – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
138. Шаханов, С.Б. Дефекты сварных соединений и методы их устранения [Текст] / С.Б. Шаханов – Л., 1980. – 80 с.
139. Лепихин, А.М. Прогнозирование надежности элементов сварных металлических конструкций по критериям механики разрушения [Текст] / А.М. Лепихин, А.М. Козлов, В.В. Москвичев // Металлические конструкции для работы в суровых климатических условиях. – Красноярск, 1982. – С. 38-52.
140. Wecher, P.E. Statistical evaluation of defects in welds and design implication / P.E. Wecher, V.Hunsen // Danish Atomic Energy Commission. 1974. – P. 836-852.
141. Lenoe, E.M. Statistical considerations in linear elastic fracture mechanics / E.M. Lenoe, D.M. Neal, I. Spiridigliizzi // Journal Aircraft. – 1975. - Vol. 12. - №4. – P. 411-420.
142. Bruckner, A. Prediction of failure probabilities for cleavage fracture from the scatter of crack geometry and of fracture toughness using weakest link model / A. Bruckner, D. Munz // Engineering Fracture Mechanics. – 1983. - Vol. 18. - №2. – P. 359-375.
143. Труфяков, В.И. Оценка надежности сварных соединений с учетом свойств материала, особенностей технологии сварки и методов контроля [Текст] / В.И. Труфяков, В.С. Гиренко, В.Ф. Давиденко // Выбор и обеспечение методов и норм контроля сварных соединений. – Л.: ЛДНТП, 1976. – С. 69-73.
144. Моцохин, С.Б. Вакуумный контроль сварных швов стальных соединений [Текст] / С.Б. Моцохин – М.: ЦБТИ, 1968. – С. 88-92.
145. Николаев, Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций [Текст] / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
146. Макаров, И.И. Прочность и пластичность стыковых соединений из сплава АМГ6 с неполным проплавлением [Текст] / И.И. Макаров, Т.М. Емельянова // Сварочное производство. – 1968. - №2. – С. 3-4.
147. Карзов, Г.П. Оценка технологической прочности сварных узлов с технологическими дефектами [Текст] / Г.П. Карзов, В.П. Леонов, Б.Т. Тимофеев // Малоцикловая усталость сварных конструкций. – Л.: ЛДНТП, 1973. – С. 57-62.
148. Карзов, Г.П. Влияние дефектов на малоцикловую усталость сосудов давления [Текст] / Г.П. Карзов, М.П. Розанов, Б.Т. Тимофеев // Тр. Всесоюз. симпозиума по вопросам малоцикловой усталости. – Каунас, 1971. – 72 с.
149. Rules for the design Construction and Inspection of Offshore Structures. Appendix C. Steel Structures. – Det Nirske Ueritas. Reprint with Correction, 1979. – P. 31-36.
150. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах [Текст] / Стрижало В.А., Филин Н.В., Куранов Б.А. и др. – Киев: Наук. думка, 1988. – 240 с.
151. Ханухов, Х.М. Влияние технологических перегрузок и низких температур эксплуатации на ресурс сварных листовых металлоконструкций [Текст] / Х.М. Ханухов, Н.И. Пидгурский, А.Е. Воронежский // Сб. науч тр. «Трещиностойкость строительных металлических конструкций». – М., 1986. – С. 131-143.
152. Одесский, П.Д. Предотвращение хрупких разрушений металлических строительных конструкций [Текст] / П.Д. Одесский, И.И. Ведяков, В.М. Горпинченко – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1998. – 220 с.
153. Металлические конструкции [Текст] / Сб. тр. МИСИ – М., 1977. – 103 с.
154. Сопротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения [Текст] / ред. С.В. Серенсена, Р.М. Шнейдеровича. – М.: Наука, 1967. – 170 с.
155. Проектирование металлических конструкций [Текст] / В.В. Бирюлев, И.И. Кожин, И.И. Крылов, А.В. Сильвестров. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.
156. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. ИЭС им. Патона [Текст] / ред. В.И. Труфякова. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.

157. Злочевский А.Б. Долговечность элементов металлических конструкций в связи с кинетикой усталостного разрушения [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Злочевский Анатолий Борисович – М., 1985. – 383 с. См. п.37
158. Шафеев Р.А. Определение напряжений в околошовных зонах сборных металлоконструкций [Текст] // Транспортное строительство. – 1979. - №3. – С. 47-49.
159. Леонов В.П. Расчет фланцевых соединений при действии растягивающей нагрузки [Текст] // Мосты и строительные конструкции. – М., 1973. - Вып. 56. – С. 67-72.
160. Бабаев А.В. Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в сварных соединениях с непроваром [Текст] // Автоматическая сварка. – 1977. - №12. – С. 30-32.
161. Георянев, М.Н. Влияние низких температур на циклическую трещиностойкость стали [Текст] / М.Н. Георянев, Н.Я. Межова, О.П. Осташ // Циклическая трещиностойкость металлических материалов и элементов конструкций транспортных средств и сооружений. – М.: Транспорт, 1984. – С. 12-25.
162. Игнатьева, В.С. Влияние остаточных напряжений на развитие усталостной трещины в области сварного стыкового шва [Текст] / В.С. Игнатьева, Р.Р. Кулахметьев, В.В. Ларионов // Автоматическая сварка. – 1985. - №1. – С. 1-4.
163. Игнатьева, В.С. Развитие усталостных трещин в зависимости от распределения сварочных напряжений [Текст] / В.С. Игнатьева, Р.Р. Кулахметьев, В.В. Ларионов // Применение методов механики разрушения в расчетах строительных металлических конструкций на хрупкую прочность и долговечность. – Красноярск, 1984. – С.131-132.
164. Чудновский, А.Д. Исследование низкотемпературной прочности стали при циклическом нагружении [Текст] / А.Д. Чудновский, И.М. Рафалович // Проблемы прочности. – 1974. - №1. – С. 91-93.
165. Kawasaki, T. Tangle crack growth / T. Kawasaki, S. Nakanishe, I. Sawaki // Engineering Fracture Mechanics. – 1975. - №3. – P. 12-18.
166. Clark, W.G. Influence of temperature and section size on fatigue crack growth behavior in Ni-Mo-V alloy steel / W.G. Clark, H.E. Trout Jr. // Engineering Fracture Mechanics. – 1975. - Vol. 7. - №3. – P. 465-472.
167. Трощенко, В.Т. Исследование влияния низких температур на закономерность развития усталостных трещин в стали 15Г2АФДпс [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский // Проблемы прочности. – 1975. - №10. – С. 8-11.
168. Трощенко, В.Т. Исследование закономерностей усталостного и хрупкого разрушения стали 15Г2АФДпс при низких температурах [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский // Проблемы прочности. – 1975. - №3. – С. 11-17.
169. Покровский, В.В. Исследование влияния низких температур и вида нагружения на закономерности усталостного разрушения ряда конструкционных сталей и сплавов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1972. – 18 с.
170. Tschegg, E. Fatigue crack propagation a threshold in b.c.c. and f.c.c. metal at 77 and 293 K / E. Tschegg, S. Stansi // Acta Metallurgia. – 1981. - №1. – P. 33-40.
171. Влияние низких температур на скорость и микрофрактографические особенности развития усталостной трещины в малоуглеродистой стали [Текст] / А.Я. Красовский, О.П. Осташ, В.А. Степаненко и др. // Проблемы прочности. – 1977. - №4. – С. 74-78.
172. Развитие усталостного разрушения в листовой малоуглеродистой стали при комнатной и низкой температурах [Текст] / С.Я. Ярема, А.Я. Красовский, О.П. Осташ и др. // Проблемы прочности. – 1977. - №3. – С. 21-26.
173. Ярема, С.Я. Исследование развития усталостных трещин при низких температурах [Текст] / С.Я. Ярема, О.П. Осташ // Физико-химическая механика материалов. – 1975. - №2. – С. 48-52.
174. Clark, W.G. How crack growths in structural steels // Metal progress. – 1970. - Vol. 97. - №5. – P. 81-86.

175. Kawasaki, T. Fracture toughness and fatigue crack propagation in high strength steel from temperatures to (-180) 0C // Engineering Fracture Mechanics. – 1975. – №3. – P. 465-472.
176. Кудрявцев, И.В. Низкотемпературная прочность конструкционных сталей [Текст] / И.В. Кудрявцев, А.Д. Чудновский, Н.М. Рафалович // Проблемы прочности. – 1976. – №1. – С. 8-10.
177. Сопротивление малоцикловой усталости конструкционных сталей при воздействии низких температур [Текст] / А.Д. Чудновский, М.Н. Рафалович, О.Н. Винклер, В.В. Ларионов // Вопросы прочности крупных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – Кн.112. – С. 10-13.
178. Anctil, A.A. Effect of tempering temperature on fatigue crack propagation in 4340 steel / A.A. Anctil, E.B. Kula // ASTM STP. – 1970. – №462. – P. 297-317.
179. Дудин, А.И. Влияние низкой температуры на развитие усталостных трещин в сварных соединениях стали 14Х2ГМР при повторном ударном нагружении [Текст] // Проблемы прочности. – 1984. – №8. – С 121-123.
180. Эффективность упрочнения наклепом сталей при ударном циклическом нагружении в условиях низких температур / Н.В. Кудрявцев, Л.А. Колодезный, Г.В. Топоров, Л.И. Бурмистров // Проблемы прочности. – 1972. – №1. – С. 84-89.
181. Пидгурский, Н.И. Оценка влияния механических перегрузок на малоцикловую прочность строительных сталей и их сварных соединений при пониженных температурах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова, 1986. – 20 с.
182. Валь, В.Н. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции [Текст] / В.Н. Валь, Е.В. Горохов, Б.Ю. Уваров – М.: Стройиздат, 1987. – 219 с.
183. Ладыгин, А.И. Пути совершенствования методов обследования металлоконструкций [Текст]. – Челябинск.
184. Злочевский, А.Б. Методы регистрации и обработки результатов динамических испытаний конструкций [Текст]. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1977. – Ч. 2. – 84 с.
185. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст]. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
186. Браун, У. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации [Текст] / У. Браун, Дж. Строули – М.: Металлургия, 1972. – 248 с.
187. РД50-260-81. Определение характеристик вязкости разрушения трещиностойкости при статическом нагружении. – М.: Стандарты, 1982.
188. Influence of residual stress on fatigue crack growth rate / M. Chitochi, N. Fumio, H. Jasuaki, T. Koei // Proc. Jap. Soc. Civ. Eng. – 1983. – №330. – P. 161-168.
189. Бабаев, А.А. Влияние остаточных напряжений на рост трещин усталости в сварных соединениях судовых конструкций [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1980. – 19 с.
190. Черепанов, Г.П. О распространении трещин в сплошной среде [Текст] // Прикладная математика и механика. – 1967. – №31. – Вып. 3. – С. 476-488.
191. Rice, J.R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notched and cracks // J. Appl. Mech. – 1968. – №35. – Ser. E. – P. 287-298.
192. Синяговская, М.С. Зависимость вязкого разрушения от температуры испытания строительных сталей относительно малых толщин [Текст] / М.С. Синяговская, Ж.Д. Рубаева // Металлические конструкции для работы в суровых климатических условиях: Сб. науч. тр. / Красноярский ПромстройНИИпроект. – Красноярск, 1982. – С. 84-99.
193. Landes, J.D. Test result from J-integral studies: an attempt to establish a J testing procedures. Fracture analysis / J.D. Landes, J.A. Begley // ASTM STP 560. – P. 170-186.
194. Begley, J.A. The J-integral as a fracture criterion / J.A. Begley, J.D. Landes // Fracture Toughness. – Pt. II. – ASTM STP 514. – 1972. – P. 1-20.

195. Landes, J.D. The effect of specimen geometry on J / J.D. Landes, J.A. Begley // Fracture Toughness. – Pt. II. – ASTM STP 514. – 1972. – P. 24-39.
196. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик сопротивления развитию трещины (трещиностойкости) при циклическом нагружении [Текст]. – Львов: ВНИИМАШ Госстандарта СССР, ФМИ АН УССР, 1979. – 126 с.
197. Дайчик, М.Л. Методы и средства натурной тензометрии [Текст] / М.Л. Дайчик, Н.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
198. Владимиров, В.Ф. Определение деформированного состояния вблизи вершины трещины в пластичных сталях [Текст] / В.Ф. Владимиров, Л.А. Бондарович, А.В. Корчин // Металлические конструкции в строительстве / Сб. тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева. – М., 1979. – №152. – С. 141-146.
199. Парфутина, И.В. Малоцикловая усталость элементов металлических конструкций при нерегулярном нагружении [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1984. – 21 с.
200. Шаповалов, Э.Л. Прочность и хладостойкость стальных конструкций из холодногнутых профилей открытого сечения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 1999. – 197 с.
201. Бандин, О.Л. Упругопластическое состояние и малоцикловая усталость алюминиевых сферических оболочек с патрубками [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1975. – 22 с.
202. Record-bridge shows age // Engineering News Records. – 1984. – №14. – 213 p.
203. Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст]. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
204. Шувалов, А.Н. Влияние испытательной перегрузки на усталостную долговечность листовых конструкций [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1982. – 22 с.
205. Бильтриков, В.Н. Экспериментальные исследования напряженного и деформированного состояний в зоне концентрации напряжений при упругих, малых и средних пластических деформациях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1966. – 15 с.
206. Fried, M.J. Notched bar tension tests on annealed carbon steel specimens of various sizes and contours / M.J. Fried, G. Sachs // Symposium on metals as related to forming and service. – ASTM, special Technical Publication, 1949.
207. Moller, H. Neerfelg. Jahrbuch der deutsch Left-fahrforschung, Bd. 11, 314, 212, 1941.
208. Ильюшин, А.А. Пластичность [Текст]. – ОГИЗ, 1948. – 376 с.
209. Бондарович, Л.А. Влияние низких температур на ресурс сосудов давления [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1975. – 23 с.
210. ГОСТ 8.011-72. Показатели прочности измерения и формы представления результатов измерения [Текст]. – М.: Стандарты, 1972. – 5 с.