

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**К.К. Нежданов, А.К. Нежданов**

**РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫНОСЛИВОСТИ  
ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК  
ПРИ ТЯЖЁЛОМ РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Пенза 2015

УДК 624.075.23.014(075)

ББК 38.54

Н43

Рецензенты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения» В.З. Зверовщиков (ПГУ); кандидат технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции» В.С. Абрашитов (ПГУАС)

**Нежданов К.К.**

Н43      Решение проблемы выносливости подкрановых балок при тяжёлом режиме эксплуатации: моногр. / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 124 с.  
**ISBN 978-5-9282-1255-1**

Посвящена проблеме создания выносливых, с высоким техническим ресурсом подкрановых балок, их расчёту и конструированию. Новые статистические обработки экспериментальных результатов выполнены на базе 10 млн циклов прокатываний колёс кранов, что позволяет гарантировать достаточный технический ресурс и срок безопасной эксплуатации подкрановых балок.

Подготовлена на кафедре «Строительные конструкции» и предназначена для использования аспирантами, магистрантами направления 08.04.01 «Строительство», а также научными работниками и преподавателями. Может быть полезна студентам, изучающим курс «Металлические конструкции».

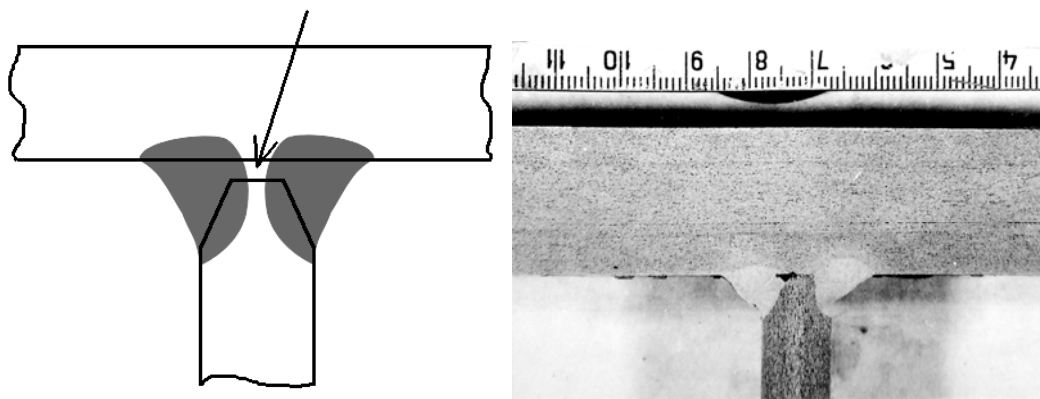
**ISBN 978-5-9282-1255-1**

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2015  
© Нежданов К.К., Нежданов А.К., 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Замена подкрановых балок всегда связана с большими экономическими затратами, поскольку для осуществления такой операции требуется остановка производственного процесса. Это особенно сложно в сталелитейных цехах, поскольку выплавка стали – процесс непрерывный и требуется постоянное обслуживание мартеновских печей или конверторов мостовыми кранами. Если же подкрановые пути повреждаются, то невозможно расплав стали переместить к месту разливки.

В соответствии с «Правила производства и приёмки работ» эксплуатации любых стальных конструкций с трещинами [1, с.24] недопустима. Однако при обследовании подкрановых балок в подрельсовой зоне в сварных швах, соединяющих пояс со стенкой балки, часто обнаруживают усталостные трещины. Эксплуатация подкрановых балок с трещинами опасна, так как возможно возникновение предельного состояния в подкрановой балке и внезапное её обрушение вместе с мостовым краном. По ведомственным нормам, **минимальный срок службы** подкрановой балки должен составлять **10 лет** [2, с.59]. Соответственно, при расчёте подкрановых балок на выносливость мы должны исходить из количества циклов, которые накапливаются за такой срок эксплуатации.



Непровары в зоне сплавления пояса со стенкой: схема и фото [3]

В настоящее время СНиП [3, с. 47] рекомендует производить расчёт на базе 2 миллионов циклов прокатываний колёс кранов, что совершенно недостаточно.

Расположение сварного шва в наиболее напряжённой подрельсовой зоне является одним из главных недостатков, так как в этой зоне амплитуды колебаний сдвигающих напряжений наиболее велики. Проблема обостряется в результате нарушения технологии изготовления балок. При толщине стенок балок 14...16 мм К-образная разделка кромок производится не всегда, что приводит к наиболее опасным дефектам – непроварам

в пояском шве. В результате работоспособность поясного шва катастрофически падает.

Из-за расположения К-образного сварного шва в наиболее напряжённой подрельсовой зоне балки обладают недостаточной выносливостью вследствие большой динамики воздействий колёс кранов на балку в этой зоне. Коэффициенты динамичности достигают величины **1,8** [5, 8, 9], поэтому актуальность гашения динамики воздействий колёс кранов высокая. Гашением динамики воздействий колёс кранов рессорами, амортизаторами проблема низкой выносливости и преждевременного возникновения усталостных трещин может быть значительно снижена.

Рассмотрению проблем недостаточной выносливости балок и вариантам их решения и посвящена эта монография.

# 1. РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК

## 1.1. Совершенствование конструкций подкрановых балок

В настоящее время диаграммы пределов выносливости для сварных и прокатных двутавровых балок в строительные нормы не внесены. Подкрановые балки конструируют шаблонным методом, профиль балок практически не претерпел изменений с момента перехода к сварным балкам в тридцатых годах XX века [7]. Колебания циклов локальных напряжений приводят к преждевременному возникновению усталостных трещин в подрельсовой зоне стенок подкрановых балок, а расчёт на выносливость не выполняется. Требуется новый принцип конструирования балок.

Масса мостовых кранов по отношению к поднимаемым грузам недопустимо высока. Так, масса кранов превышает порой массу крана в 2,5...3 раза [7, 8]. Поэтому даже движение незагруженного крана вызывает опасные колебания циклов локальных напряжений в подрельсовой зоне стенки. Двойные гребни (реборды) на колёсах вызывают трение скольжения, которое в  $\approx 200$  раз превышает трение качения, а сопротивление продольному движению крана увеличивается примерно в *два раза*. Износ же рельсов и колёс кранов увеличивается в несколько раз.

Уменьшение сопротивления продольному движению мостовых кранов легко обеспечить заменой гребней направляющими роликами [8, Т.2, с.312, рис.V.2.40]. Направляющие ролики обеспечивают снижение сопротивления продольному движению примерно *в два раза*. Такая замена позволяет существенно уменьшить затрату энергии при движении мостовых кранов.

Другой недостаток мостовых кранов – их большая высота (8...10 м), что приводит к увеличению габаритов мартеновских и конверторных цехов. Расстояния между колёсами кранов не согласованы с вызываемыми ими локальными напряжениями в стенках балок. Амплитуды локальных воздействий могут быть снижены уменьшением расстояния между колёсами крана и увеличением моментов инерции рельсов при изгибе и кручении. Также они могут быть снижены переходом к арочным амортизирующим рельсам [21, 100].

Конструктивная форма балок также требует существенных изменений. Традиционная с 30-х годов XX века форма – сварной двутавровый профиль. Помимо подверженности зоны соединения пояса со стенкой локальным воздействиям колёс кранов, которые передаются через рельс на верхнюю зону стенки балки, такая конструкция сечения обладает низкой сопротивляемостью крутящим воздействиям. Известны балки с трубчатым (замкнутым коробчатым) верхним поясом, обладающими амортизирующими свойствами и огромными (в 100 и более раз) моментами инерции

при кручении [104, с.67]. Однако при использовании балок с трубчатым верхним поясом необходимо применение специальных подрельсовых подкладок, передающих усилия от колёс кранов на не плоский верхний пояс. Другим решением этой проблемы является использование балок двухстенчатых с замкнутым коробчатым профилем сечения. Балки с таким сечением позволяют обеспечить полную *нейтрализацию опасных крутящих воздействий*, передающихся от колёс кранов на подрельсовую зону балки [104, с.67].

До 1970 г. расчёт подрельсовой зоны на выносливость не был включён в нормы [3, 4]. В настоящее время по нормам расчёт выполняется *на базе двух миллионов циклов прокатываний колёс кранов* [3, с.47], что *недостаточно*. По рекомендациям норм, балки с тяжёлым режимом работы (8К) мостовых кранов должны гарантированно обеспечивать безопасную беспрерывную эксплуатацию в течение *не менее 10 лет* [2]. За это время накапливается порядка 6 миллионов циклов [2, 3, 6] прокатываний колёс кранов (интенсивность накопления – 0,6...0,7 млн циклов в год). Поэтому необходим переход к расчёту на базе *не менее шести миллионов циклов прокатываний колёс кранов* [41, 42].

## 1.2. Воздействия колёс кранов на подкрановые конструкции в эксплуатируемых цехах

Динамические воздействия каждого из движущихся колёс кранов передаются на рельсы, а затем и на подкрановые балки сосредоточенно. Поэтому при прокатывании каждого из колёс возникают циклические колебания напряжений в зоне взаимодействия рельса и верхнего пояса. В третьем десятилетии XX века происходила массовая замена высококурсовых клёпаных балок сварными балками.

До середины XX века расчёт производился по допускаемым напряжениям – 160 МПа. Верхние пояса подкрановых балок были мощными, так как состояли из поясных уголков, укрепляющих вертикальных листов (ламелей), а также поясных листов (рис. 1.1), поэтому локальные напряжения были невелики. При переходе к сварным балкам верхний пояс оказался сильно ослаблен.

В результате допущенной технической ошибки не произошло адекватной замены при переходе к сварным соединениям в балках. Кроме того, интенсивность производства и накопления циклов нагружений постоянно возрастала.

В послевоенные годы появилась проблема развития опасных усталостных трещин в подкрановых балках и конструкциях их крепления. В первую очередь опасные трещины стали возникать в решётчатых конструкциях балок и мостовых кранов ввиду сильнейшей концентрации напряжений в их решётчатых узлах. В узлах применялись нахлесточные соеди-

нения, обладающие, по данным М.М. Гохберга [9, Т1, с.141], наименьшей выносливостью.

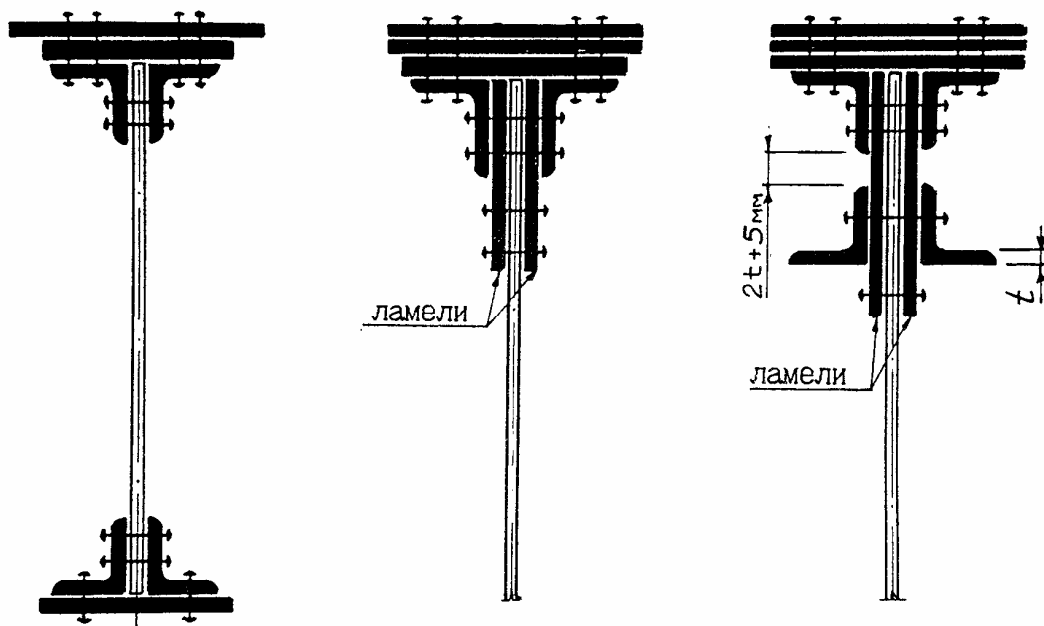


Рис. 1.1. Сечения высоконадежных клепаных подкрановых балок

До 1946 г. (НиТУ 1-46) расчётные сопротивления у малоуглеродистой стали были 160 МПа. В пятидесятые годы XX века Н.С. Стрелецким был разработан и начал внедряться расчёт по предельным состояниям [98]. Расчётные сопротивления стали были повышены до 210 МПа (1,3 раза). Локальные циклические напряжения в верхней повреждаемой зоне балок ещё более *увеличились*, усталостные трещины обнаруживались не только в решётчатых подкрановых конструкциях, но и в сварных балках двутаврового сечения со сплошными стенками из листов (рис. 1.2).

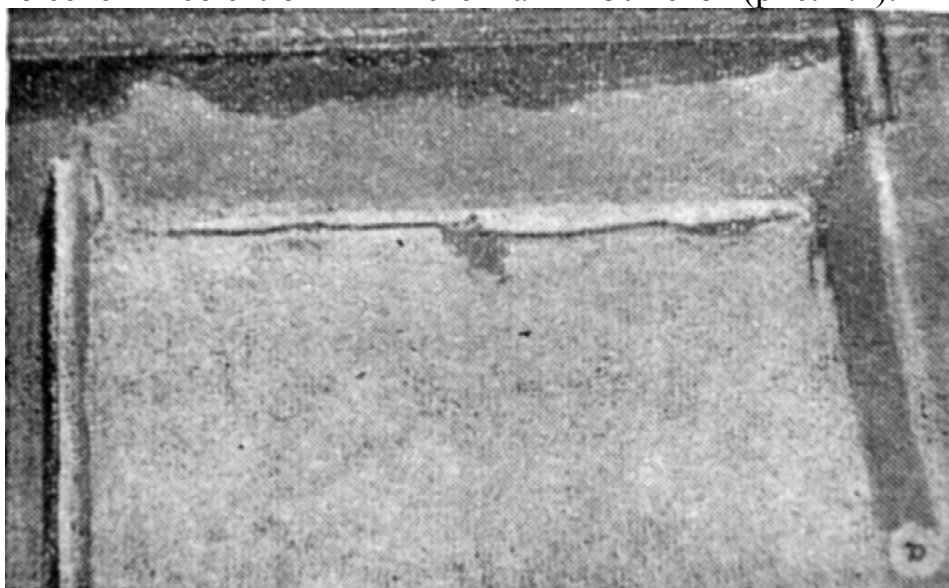


Рис. 1.2. Усталостная трещина в шве в подрельсовой зоне балки [10, 11,12]

Наиболее ярко этот процесс проходил на металлургических комбинатах (при интенсивной работе мостовых кранов). Этому способствует то, что К-образные сварные швы находятся в самой неблагоприятной, напряжённой зоне, непосредственно под подошвой рельса (в зоне наивысшей динамики воздействий колёс кранов) [3, 41, 42].

### 1.3. Автоматизация процесса изготовления балок на поточных линиях

Вначале сварка выполнялась вручную, качество и технический ресурс таких сварных швов и соединений были низкие. В 40-х годах при изготовлении военной техники (танков) появилась автоматическая сварка под слоем флюса и в среде защитных газов. Автоматическая сварка строительных конструкций появилась значительно позже. В 60-х годах под руководством Г.А. Николаева и Е.Б. Патона [14, с.387] была разработана автоматическая поточная линия, которая была смонтирована на заводе им. Бабушкина в г. Днепропетровске на Украине.

Управление автоматизированным изготовлением сварных двутавровых балок высотой сечения до 2-х метров осуществлялось с пульта управления. Заранее изготавливались элементы балки (стенка, пояса) с использованием гильотинной или газовой резки. Производилась правка листов, обработка кромок, фрезеровка торцов. Элементы конструкции подавались по рольгангам в питатель.

Поступательное движение по рольгангу сообщалось приводными роликами. На первом этапе стенка и пояса ориентировались горизонтально, затем по ходу движения с помощью гидропривода механизм поворота поворачивал балку в вертикальное положение и поступательное движение останавливалось.

Производилась точная корректировка пространственного положения стенки и поясов, и в собранном виде балка поступала в прижимной сборочный стан, оснащённый магнитным столом и механизмами, плотно прижимающими пояса к стенке. Производилась ручная прихватка поясов при горизонтальном положении стенки.

Балка кантовалась на 180° и по рольгангам направлялась в сварочный стан. В сварочном стане последовательно накладывалось четыре К-образных шва, причём перед наложением сварного шва балка ориентировалась в положение «лодочка» для получения наилучшего качества шва с проваром на всю его толщину.

На выходе из стана производился контроль качества шва одним из известных способов (ультразвуковым или магнитным) и двутавровый профиль отправлялся в цех, где вручную приваривались вертикальные опорные и промежуточные рёбра жёсткости.



На наш взгляд, необходимо рёбра жёсткости располагать горизонтально в верхней четверти стенки. Такие рёбра легко приварить автоматической сваркой на модернизированной поточной линии, то есть значительно повысить производительность при изготовлении.

Автоматическое изготовление подкрановых балок на поточной линии даёт несколько преимуществ. Во-первых, качество автоматической сварки по сравнению с ручной сваркой значительно выше, что снижает количество дефектов (непроваров и шлаковых включений в шве), которые являются концентраторами напряжений. Во-вторых, увеличивается производительность труда, что существенно уменьшает время при изготовлении балки.

К сожалению, сварные двутавровые профили подкрановых балок обладают существенным недостатком – верхний сварной поясной шов с К-образной разделкой соединяемых листов находится в напряжённой подрельсовой зоне, где циклические воздействия колёс мостовых кранов достигают экстремальных величин, а амплитуды циклов локальных напряжений также достигают экстремальных величин.

В настоящее время назрела необходимость модернизировать автоматическую поточную линию [14, с.387] с получением как балок с соединениями на заклёпках с внедряемыми сердечниками, так и подкрановых балок с другими высокоресурсными фрикционными соединениями.

### 1.3. Рельс-макрорегулятор напряжённого состояния подрельсовой зоны стенки

Одной из важнейших систем, удовлетворяющих потребности людей по транспортированию грузов, является стремительно развивающаяся транспортная система.

Систем транспорта множество, все системы функционируют не одну сотню лет, и темп их развития ускоряется. К системам транспорта грузов относится и транспортирование массивных грузов в производственных цехах мостовыми кранами, перемещающимися по рельсовым путям, уложенным по подкрановым балкам.

Очевидно, что ближайшим прототипом мостовых кранов являются паровозы, локомотивы, вагоны железнодорожного транспорта. Локомотивы и вагоны также движутся по рельсам, уложенным и по мостам.

Сопоставление мостовых кранов с паровозами и локомотивами выявляет парадокс – мостовые краны являются **единственными** из множества транспортных механизмов, которые лишены гениального изобретения человека: **рессор, пружин, амортизаторов, демпферов**, гасящих динамику воздействий колёс мостовых кранов на рельсы, на подкрановые балки и

узлы креплений конструкций. (Первая пружина и предварительно напряжённая конструкция – это оружие древнего человека – лук).

В настоящее время подвеска колёс у кранов жёсткая, без подрессоривания (см. рис. 1.5) [8, Т.2 с.411, рис. V1.2.7], что приводит к возрастанию динамики воздействий колёс не только на подкрановые балки, но и на конструкции мостовых кранов до опасных величин.

По неизвестным причинам мостовые краны отстали в развитии по способу подвески колёс от других транспортных средств. Остальные транспортные средства снабжены рессорами, смягчающими динамические воздействия колёс и повышающие продолжительность срока службы как нижележащих конструкций, так и самих транспортных средств. Мостовые краны с **рессорами** изобретены [101, RU №2296098], однако выпуск их не освоен промышленностью.

В настоящее время имеются железнодорожные рельсы и специальные крановые рельсы (рис. 1.3, 1.4). И те и другие являются двутавровыми в сечении. Рельсы предназначены для направления движения кранов и равномерного распределения давления от колёс кранов на подкрановые балки. Крановые рельсы более массивные, имеют одинаковую высоту и ширину сечения, толщина стенок достигает 30...60 мм. Это вызвано тем, что сосредоточенные воздействия от колёс мостовых кранов достигают 9400 гН (94 т) [8, Т2, 13, с.105]. Для сравнения – на железных дорогах сосредоточенные воздействия каждого из колёс локомотивов достигает 1500...2000 гН (15...20 т), то есть в 4...6 раз меньше!

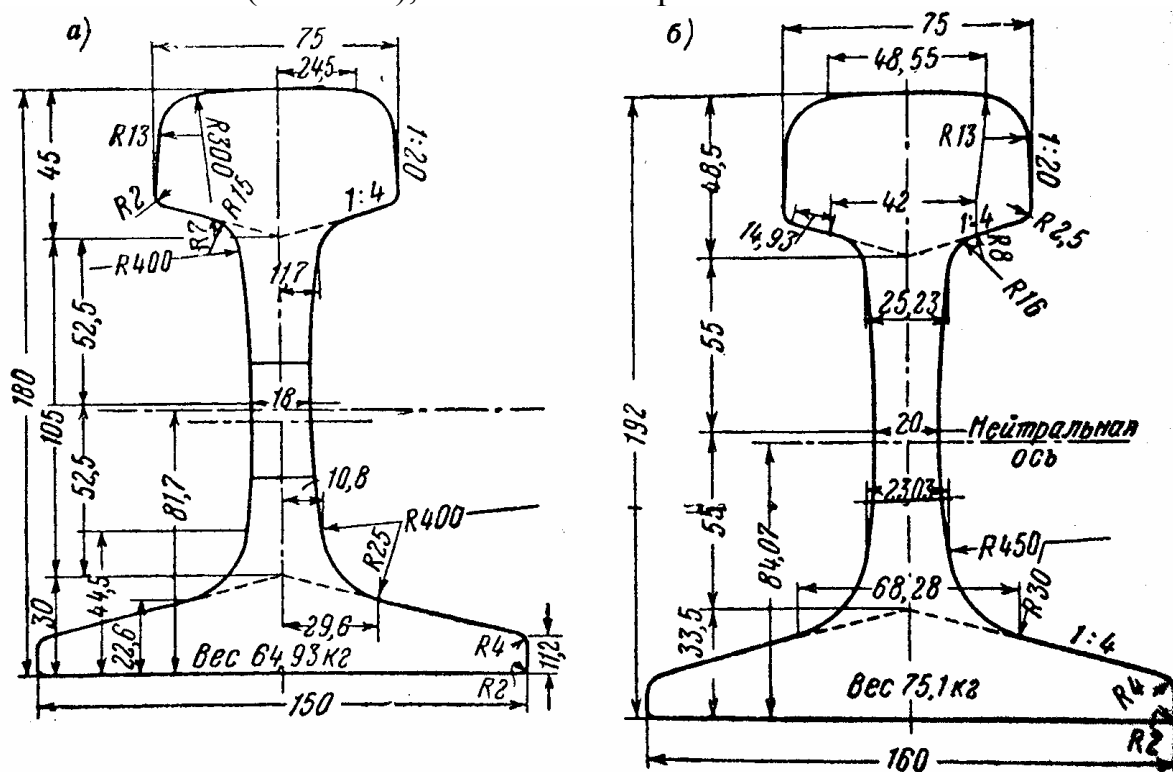


Рис. 1.3. Профили железнодорожных рельсов:  
а – Р-65; б – Р-75

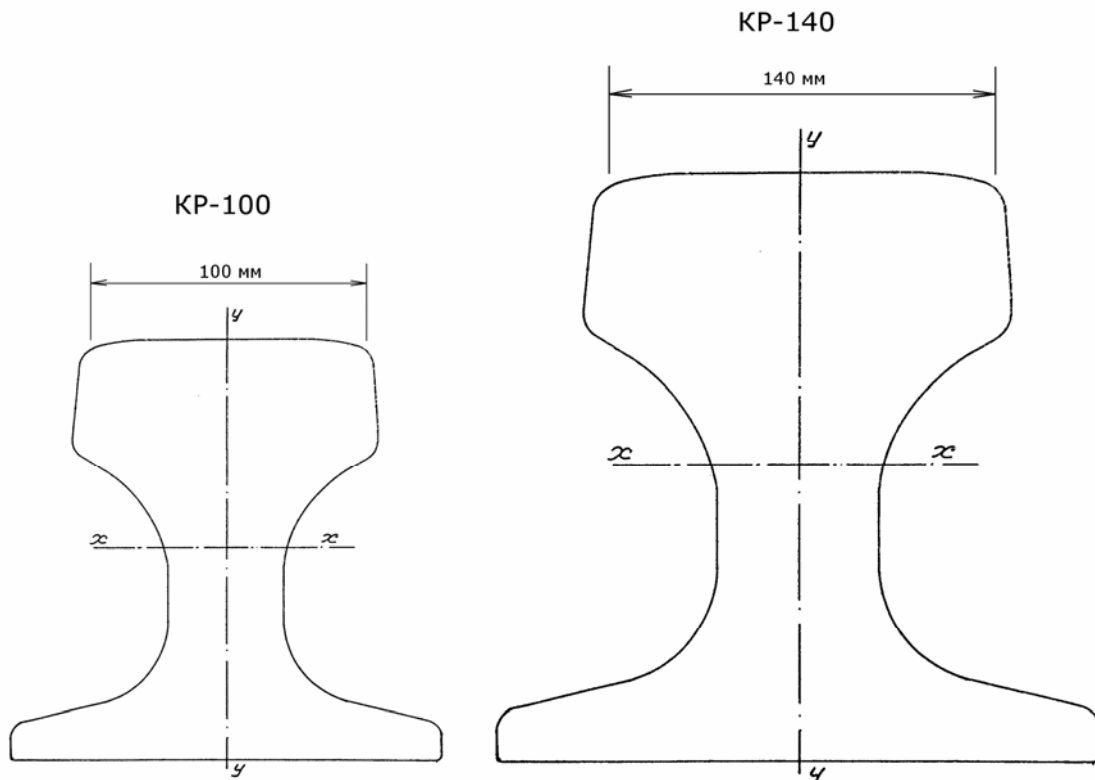


Рис 1.4. Контуры крановых рельсов  
Габариты: КР-140: 190×190, КР-100: 150×150 мм

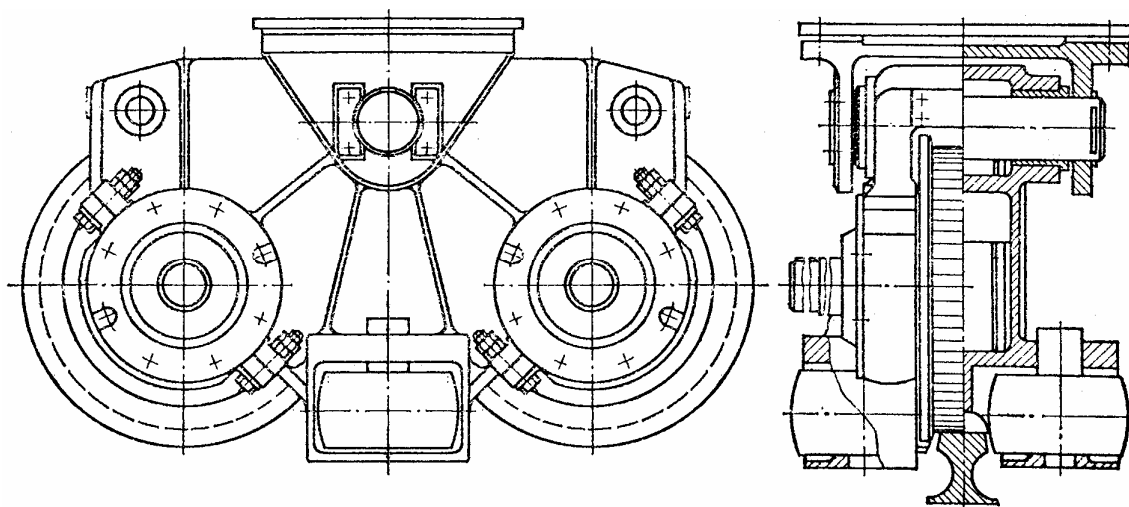


Рис. 1.5 Неподрессоренные балансирные колёса  
и направляющие ролики крана «Сибтяжмаш» [8, с. 312, рис.V.2.40].  
Гребни безопасности заменены направляющими роликами

Величина локального давления каждого из колёс может регулироваться числом колёс у крана, но это приводит к увеличению габаритов крана и усложнению его конструкции. В настоящее время подвеска колёс у кранов жёсткая [8, с. 312, рис.V.2.40], без подрессоривания (см. рис. 1.5), это приводит к *значительному возрастанию динамики воздействий колёс.*

Жёсткий способ подвески колёс в эксплуатируемых кранах существует со времени их появления вопреки тому, что все другие транспортные средства снабжены рессорами, смягчающими динамические воздействия и повышающие продолжительность срока службы как нижележащих конструкций, так и самих транспортных средств.

До тех пор пока не начнётся производство мостовых кранов с рессорами, следует производить *подрессоривания* рельсов и самих подкрановых балок в узлах из крепления. Ввиду значительной величины сосредоточенных воздействий, передаваемых от колёс кранов на подкрановые конструкции, удобно применять арочные рельсы, обладающие естественной *амортизирующей способностью* [21, 97, 98], а также амортизирующие верхние пояса балок и балки коробчатых сечений [101, 102].

В тридцатые годы XX века подкрановые балки были клёпаными. Мощные верхние пояса балок выравнивали колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне, распределение контактных напряжений способствовало повышению долговечности. В настоящее время мощность верхнего пояса сварных балок в **50...60 раз** меньше мощности рельса. Для 12-метровой балки и кранов грузоподъёмностью 200/32 т соотношение между моментами инерции рельса КР-120 и верхним пояса равно:  $4923,8/84,6=58,2$ , то есть **макрорегулятором** напряжённого состояния является рельс. Рельсы быстро изнашиваются, их приходится часто заменять. Например, на Череповецком металлургическом комбинате «Северсталь» срок службы рельсов в мартеновском цехе – *меньше года*.

Если же увеличивать мощность рельсов, то это благоприятно сказывается как на сроке службы рельсов, так и на выносливости подкрановых балок. Самый мощный прокатываемый в настоящее время рельс – это КР-140.

В настоящее время разработаны новые **арочные** рельсы, защищённые пакетом из девяти патентов [21, 104]. К сожалению, выпуск новых арочных рельсов не налажен, *рекомендуем* объединять существующие рельсы в рельсовые блоки [16–19], наращивать их мощность и этим увеличивать выносливость подрельсовой зоны.

Недостатки существующих рельсов следующие. В действующем ГОСТ 4121-62 моменты инерции рельсов при кручении *завышены около трёх раз* [74, с.60]. Рельсы не обладают амортизирующей способностью. Стыки рельсов неравноценны по прочности целому рельсу. Стыки обязательно должны быть перекрыты стыковыми накладками фрикционным соединением. Неперекрытые стыки **недопустимы**. На рис.1.6 показано безударное стыковое соединение рельсов [20] с перекрытыми стыками.

К сожалению, в действующих цехах часто встречается, не перекрытый накладками стык. Это приводит к таким дефектам пути [3], как «зазор» (рис.1.7), смещение вбок (рис.1.8) и «ступенька» (рис.1.9), которые пагубно сказываются на работоспособности подрельсовой зоны [10–13, 40, 42].

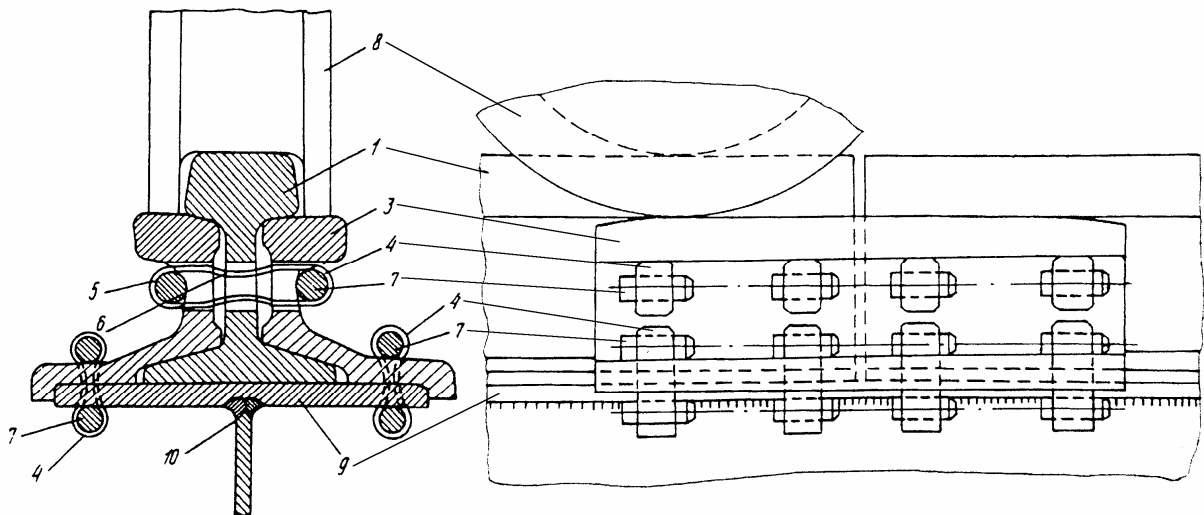


Рис. 1.6. Безударное стыковое соединение рельсов [20]



Рис. 1.7. Аварийный зазор в стыке рельсов

По техническим условиям «зазор» не должен превышать 6 мм, «ступенька» по высоте – 3 мм, а в поперечном направлении – 4 мм [2, с.69]. Рельсы в стыке быстро изнашиваются и возникают трещины (рис. 1.11) и выкрашивание (рис. 1.12) [2]. В не перекрытых накладками стыках пагубные процессы ускоряются в десятки раз.

Разрушение рельса часто приводит к сходу крана с рельсов. А при сходе крана с рельсов колесо крана производит по верхнему поясу подкрановой балки мощный удар. Если, балка уже повреждена трещинами, то вероятность возникновения *хрупкого разрушения балки и её обрушение катастрофически возрастают.*

У существующих рельсов нет балансировки сечения, то есть главная ось не делит высоту сечения пополам. В результате чего моменты сопротивления на верхней и нижней гранях не совпадают, то есть материал использован нерационально.

У железнодорожных рельсов высота примерно в 1,5 раза больше ширины, поэтому его сложнее прикрепить к верхнему поясу балки при горизонтальных воздействиях колёс кранов. Рельсы впервые появились с изобретением железной дороги, с тех пор в их конструкции мало что изменилось. Существуют решения для снабжения рельсов амортизирующими свойствами, повышения их моментов инерции и моментов сопротивления. Эффективные *арочные* профили рельсов обладают естественной амортизирующей способностью, гасящей динамику воздействий колёс мостовых кранов [22]. Подкрановые балки с трубчатым верхним поясом, также обладают естественной амортизирующей способностью [21, 83, 85].

В настоящее время установлено, что моменты инерции рельсов при кручении в ГОСТ 4121-62\*[74, с.60] в  $\approx 3$  раза *завышены* [100]. В то же самое время установлено, что момент инерции кручения прямоугольного рельса в  $\approx 3$  раза больше, чем в ГОСТ 4121-62\*. Поэтому со временем прямоугольные в сечении рельсы вытеснят стандартные по ГОСТ 4121-62\* [104].



Рис. 1.8. Накладки отсутствуют.  
Опасное смещение рельса в стыке в поперечном направлении

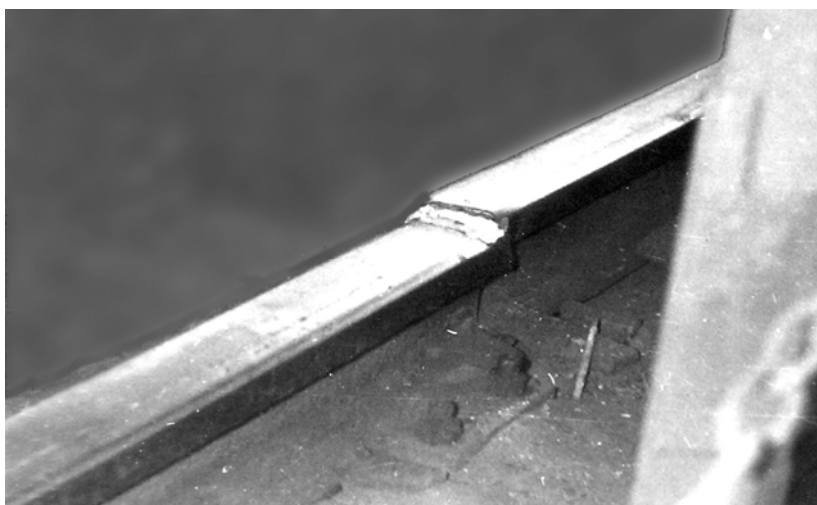


Рис. 1.9. Рельсы разной высоты. «Недопустимая ступенька» в стыке рельсов



Рис. 1.10 Аварийная усталостная трещина в главе рельса



Рис. 1.11. Аварийное разрушение и выкрашивание сварного шва в стыке рельса над стыком смежных балок

#### 1.4. Сечения испытываемых балок

##### Цель исследований

Повысить выносливость и работоспособность сварных подкрановых балок с тяжёлым интенсивным режимом работы совершенствованием принципа их конструирования, продлив их работоспособность до 6 млн прокатываний колёс кранов.

## Задачи исследований

1. Разработать новый принцип конструирования. Принцип заключается в удалении К-образных швов из подрельсовой зоны балок на расстояние, где колебания сдвигающих напряжений затухают столь значительно, что не в состоянии вызвать возникновение и развитие трещин.

2. Разработка новых рельсовых блоков, являющихся макрорегуляторами локальных напряжений с использованием освоенных промышленностью рельсов. Разработка необходима в настоящее время потому, что прокат новых арочных рельсов пока не налажен. Используя же рельсовые блоки, состоящие из стандартных рельсов и подрельсовых подкладок, можно увеличить моменты инерции при изгибе и кручении в несколько раз. Новые рельсовые блоки позволяют автоматизировать трудоёмкие процессы замены рельсов без остановки движения по ним кранов. Увеличивая моменты инерции рельсовых блоков, мы можем настолько снизить колебания сдвигающих напряжений, что возникновение усталостных трещин станет невозможным.

3. Разработка сварных подкрановых балок с использованием нового принципа конструирования и новых рельсовых блоков.

4. Статистическая обработка результатов усталостных испытаний. Получение корреляционной связи между амплитудами симметричных циклов колебаний сдвигающих напряжений и числом циклов до появления усталостных трещин на базе 6 миллионов прокатываний колёс кранов.

5. Получение диаграммы пределов выносливости для сварных подкрановых балок и разработка методики расчёта на выносливость с использованием полученной диаграммы.

6. Обосновать необходимость замены двутавровых подкрановых балок со сварным К-образным швом в непосредственной близости к зоне контакта рельса и пояса к балкам с новым профилем сечения и переносом К-образного сварного шва в зону, где вероятность появления усталостных трещин минимальна. Исследования производятся на основе обработки результатов расчётов на выносливость сварных двутавровых балок и балок новой конструктивной формы.

7. Разработать систему управления напряжённо-деформированным состоянием подрельсовой зоны подкрановых балок, а также обосновать необходимость восстановления проектного положения конструкций рельсовых путей мартеновских и конверторных цехов посредством перемещения фундаментами с реактивной тягой, являющихся макрорегуляторами, колонн каркаса.

8. Автоматизировать восстановление работоспособности подкрановых конструкций, повреждённых усталостными трещинами.



## 2. СТЕНДЫ, ИМИТИРУЮЩИЕ ПОДВИЖНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОЛЁС МОСТОВЫХ КРАНОВ

### 2.1. Исследования локального напряжённого состояния в стенке балки

Исследованиями выносливости занимались в МИСИ им. Куйбышева, ЦНИИСК им. Кучеренко, ЦНИИ «Проектстальконструкция». В МИСИ работы проходили под руководством А.И. Кикина [11], Е.И. Белени, Е.Н. Лессига. Вначале изучалось локальное напряжённое состояние в подрельсовой зоне стенки. Обширные исследования провели в этом направлении Б.М. Броуде [27] (ЦНИИСК им. Кучеренко) Б.Б. Лампси [23], (Горьковский политехнический институт). Были разработаны формулы для определения циклов локальных напряжений в стенке балки. Также проводились исследования по определению коэффициентов надёжности, коэффициентов динамичности: (Б.Н. Кошутин [24], Ю.С. Кунин [25], В.Н. Валь, А.В. Фигаровский [30]). Начались работы и в другом направлении – по исследованию выносливости подкрановых балок при действии домкратов-пульсаторов: Н.С. Москалёв, А.А. Апалько, И.Е. Спенглер [29], И.Н. Малышкина.

Испытания выполнялись с помощью домкратов гидропульсаторов, зафиксированных в конкретном сечении балок и были далеки от реальных воздействий колёс мостовых кранов катящихся по балкам. Поэтому в этих случаях усталостные трещины появлялись только при высоком уровне циклических локальных напряжений. «Высокий уровень» означает напряжения, близкие к пределу текучести (240...250 МПа), которые в реальных конструкциях не наблюдались (Ю.И. Кудишин [31], Э.А. Рывкин [32]). Затем методы испытаний стали совершенствоваться.

### 2.2. Имитация подвижных воздействий колёс кранов на подкрановые балки и получение линий регрессии

В Ленинградском политехническом институте на кафедре «Подъёмно-транспортное машиностроение» М.М. Гохбергом и его аспирантами была создана первая машина для испытаний подкрановых балок на выносливость подвижными *циклическими воздействиями* от одного колеса (1968–1969 гг.). Машина была небольших размеров. Испытания производил В.Н. Юшкевич [33], при этом испытываемые балки опирались всей плоскостью нижнего пояса на жёсткую опору.

Указанные испытания были далеки от реальности (малые габариты балок, опирание балки на жёсткое основание всей плоскостью нижнего пояса, большой разброс циклических локальных воздействий от одного колеса, малая производительность и прочее). Гохберг М.М. подметил

важный момент: воздействия колёсами кранов – это наиболее опасное из всех вероятных нагружений, так как в этом случае возникают наибольшие амплитуды колебаний (в первую очередь – сдвигающих напряжений), которые перемещаются вместе с движущимися колёсами кранов.

Вслед за М.М. Гохбергом, в Пензе, К.К. Неждановым [39], под руководством Е.Н. Лессига и Е.И. Белени, был разработан и запущен (в 1971 г.) стенд для испытаний на выносливость одновременно четырёх балок [34, 39] четырьмя колёсами (рис. 2.1). Под руководством Н.С. Москалёва, В.А. Балдина [35] и В.М. Горпинченко [38] был разработан стенд с гидравлическим приводом в зале усталостных испытаний в ЦНИИСК для испытаний на выносливость одной балки одним колесом (рис. 2.2). Стенд был запущен в 1972 г. На этом стенде с гидравлическим приводом проводили исследования В.П. Федосеев [36] и А.С. Лазарян [35, 36].

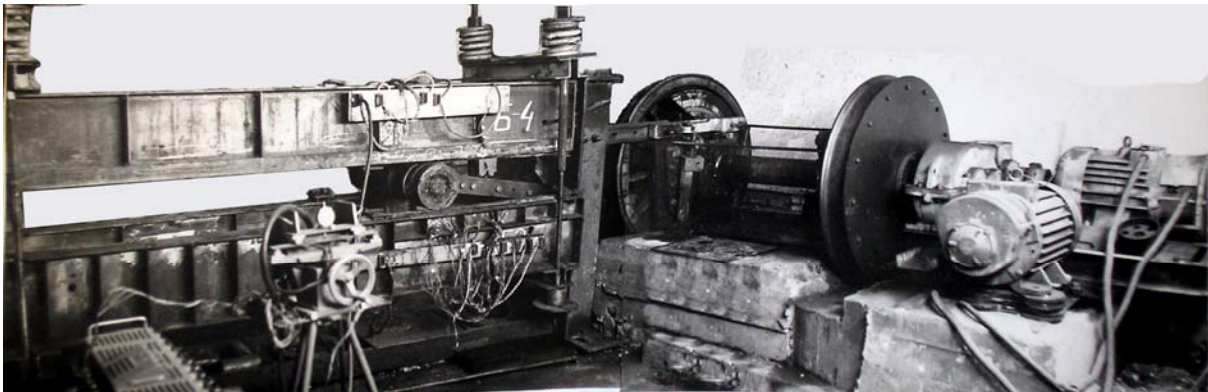


Рис. 2.1. Стенд для испытаний балок на выносливость одновременно четырёх балок в Пензе. Балки длиной 3 м (запущен в 1971 г.) [41, 42, 44]

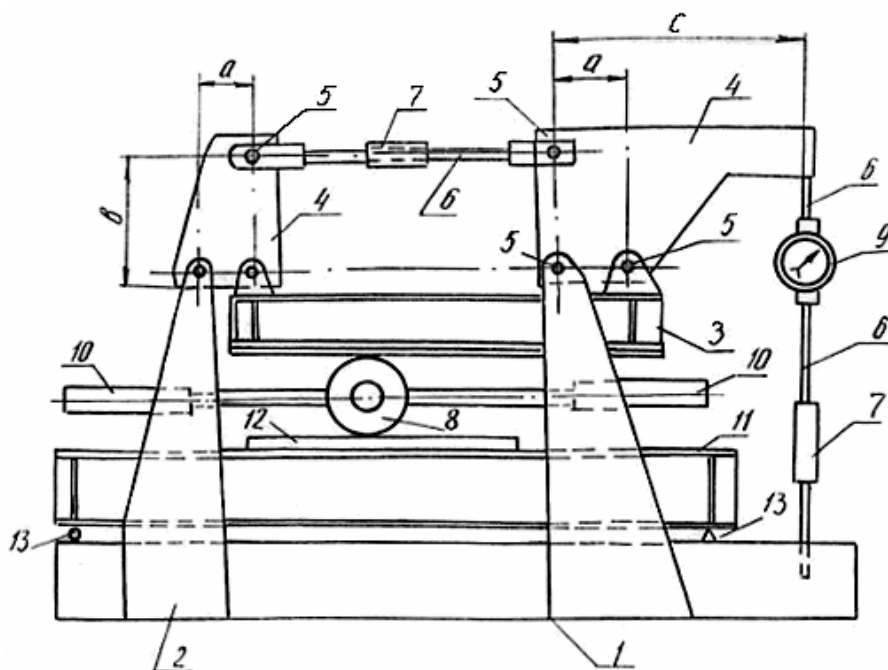


Рис. 2.2. Стенд в ЦНИИСК для испытаний одной балки одним колесом (запущен в 1972 г.) [38]

В Днепропетровске планировалось соорудить стенд для испытаний на выносливость шестиметровой балки одним колесом, но ввиду больших мощностей стенд при запуске несколько раз ломался, и результаты усталостных испытаний опубликованы не были.

Ещё один стенд был сооружён в Липецке (ЦНИИПСК) для испытания малых балок с небольшими возвратно-поступательными движениями одного колёса, испытания проводились В.И. Бабкиным [37] под руководством А.Б. Павлова. Были исследованы вопросы скорости развития трещин и обнаружено, что **по мере увеличения длины трещины, скорость её развития увеличивается.**

Серьёзным недостатком стенда, разработанного М.М. Гохбергом, являлось то, что модель балки небольшой длины  $\approx 1$  м опиралась на силовой пол по всей плоскости нижнего пояса. На этом стенде испытания проводил В.Н. Юшкевич [33]. Стенд имел низкую производительность, а также большой разброс локального давления колеса из-за положения колеса на балке.

В гидравлическом стенде (ЦНИИСК) [36, 38] также испытывалась только одна балка одним колесом, колебания колеса происходили около линии симметрии балки. Так как колесо было только одно, то наблюдалось значительное (в несколько раз) изменение силы давления колеса. Производительность стенда была низкая.

Первый механический стенд в Пензе [34, 39] с массивным маховиком (3,5 т) – колёсной пары от паровоза «Серго Орджоникидзе» – был запущен в 1971 г. Стенд позволял одновременно испытывать 4 балки (длиной по 3 м), причём каждая из балок нагружалась своим колесом. За счёт этого производительность испытаний была повышена в **четыре** раза.

С самого начала испытания производились с одной стороны от линии симметрии балки (в одной половине пролёта). Возвратно-поступательные колебания вдоль балок сообщались шатуном нагружающему блоку от массивного маховика (3,5 т). Нагружающий блок имел *четыре* колёса, посаженных на один вал. На каждой из балок закреплялся цилиндрический или шестигранный рельс (рис. 2.3), которые являлись направляющими для нагружающего блока колёс.

Рельсы подбирались такой мощности, чтобы локальные напряжения, возникающие в подрельсовой зоне, были близки к реальным напряжениям. Крепления рельсов производились вне зоны действия колёс (размах 700 мм) нагружающего блока, который был зажат между верхними и нижними балками (на верхние балки воздействия от колёс действовали снизу вверх).



Рис. 2.3. Крепление цилиндрического рельса к модели балки (Пенза)

Возвратно-поступательные колебания четырёх колёс нагружающего блока по четырём балкам с одной стороны от линии симметрии позволили значительно повысить стабильность давления каждого из колёс, а разброс величин сил от них был уменьшен в несколько раз. Однако некоторая неравномерность оставалась. На этом стенде К.К. Неждановым были испытаны 11 сварных балок (длиной по 3 м) и в процессе статистической обработки результатов испытаний на выносливость крупных моделей подкрановых балок были **впервые** получены линии регрессии для подрельсовой зоны стенки [34, 39, 41, 42].

Предел выносливости при циклических колебаниях сдвигающих напряжений в зоне стыка стенки с поясом на базе 2 млн циклов (без учёта тройного рассеяния результатов) оказался равным 81,4 МПа. Линия регрессии предел выносливости впервые были опубликованы в печати [39].

Под руководством В.А. Балдина и В.М. Горпинченко на базе 300...400 тыс. циклов прокатывания колёс были испытаны несколько трёхметровых сварных балок с габаритами сечения 400...150 мм.

Статистическая обработка результатов испытаний в Пензе [34, 39] и Москве позволила записать в СНИП «Стальные конструкции» II-23-81 [3] предел выносливости 75 МПа для К-образного шва сварных балок на базе 2 млн циклов, который действует и до настоящего времени. Предел выносливости был записан *без учёта тройного рассеяния результатов испытаний*.

Затем была обнаружена возможность дальнейшего повышения стабильности давления. Стабильность давления каждого из колёс была достигнута путём подвешивания на тягах нижней пары балок к верхней паре балок под некоторым углом. Угол продольного уклона определялся экспериментально. Величина разброса воздействий колёс была уменьшена до  $\pm 5\%$ .

Косой изгиб каждой из четырёх балок был достигнут поперечным уклоном сечения 1/10 вертикали каждой из четырёх балок. Угол наклона регулировался талрепами.

В Пензе с 1971 г. [34, 39] испытания производились регулярно. Результаты испытаний постоянно публиковались в различных журналах и в материалах конференций. В 80-х годах цель испытаний была изменена – получить выносливость на базе **четырёх** миллионов циклов прокатывания колёс. Число точек, соответствующее появлению усталостных трещин при числе циклов нагружений менее двух миллионов, было достаточным.

Необходимо было получить усталостные трещины в сварных балках при меньшей величине колебаний локальных напряжений циклами. Сосредоточенное давление колёс было уменьшено. Естественно, балки стали обладать большей выносливостью и долговечностью. Усталостные трещины были получены при **3, 4 и 5 млн** циклов прокатывания колёс.

Методика статистической обработки результатов испытаний была отработана. По мере накопления результатов усталостных испытаний строились линии регрессии на базе **4** миллионов циклов. Характер усталостных разрушений остался прежним – трещины зарождались со стороны эксцентриситета. Усталостные трещины начинались, обычно, с поверхности от каких-либо концентраторов напряжений (подрезов, шлаковых включений). Скорость развития трещины при меньшем уровне циклических локальных напряжений уменьшалась, однако по мере роста трещин скорость их роста увеличивалась. Постепенно трещины проходили сквозь стенку, длина трещины достигала 400...500 мм, в некоторых случаях – 700 мм, то есть по всей длине хода каждого из колёс стенда.

Чаще всего балка с трещиной демонтировалась из стенда и заменялась новой. Но в том случае, когда демонтаж требовался только для одной балки, допускались дальнейшие испытания до появления трещины в одной из оставшихся.

Высверливание отверстий перед остриём трещины останавливало её развитие только на короткий период. Затем трещина либо обходила отверстие, либо проходила сквозь него. В некоторых случаях трещина ответвлялась по направлению к нейтральной оси и иногда доходила до неё. При малом уровне сдвигающих напряжений рост трещины продолжался.

В результате статистической обработки были получены пределы выносливости при пульсирующих (отнулёвых) циклах сдвигающих напряжений  $\tau_{2\max}$  [41, 42]. Предел выносливости на базе **4 млн** циклов колебаний напряжений без учёта тройного рассеяния оказался равным **64,4 МПа** – то есть значительно ниже, чем при 2-х млн циклов на 23-25 %. Был сделан вывод, что расчёт балок на выносливость нужно производить на базе не менее 4-х млн циклов прокатываний колёс кранов [41]. Очевид-

но, что работоспособность сварных подкрановых балок была значительно ниже, чем балок сделанных из прокатных двутавровых профилей.

В 80-х годах стенд был модернизирован в очередной раз и возвратно-поступательным колебаниям стал подвергаться блок из пары соединённых вместе балок между моделью верхнего восьмиколёсного крана [41, 42] (рис.2.4), обращённого восьмью колёсами вниз, и моделью нижнего крана, обращённого восьмью колёсами вверх. База между пар колёс нижнего крана была больше.

В результате увеличения количества колёс до шестнадцати достоверность испытаний была повышена. Каждая из пары верхних балок испытывалась в трёх зонах, а каждая из пары нижних балок испытывалась в двух зонах. На модернизированном стенде было адекватно испытанию 5 балок на старом стенде. Соответственно увеличилась и производительность. Возникли и другие преимущества – стабильность давления колёс была высокая. Стабильность достигалась тем, что колёса были объединены попарно балансиром (рис. 2.4).

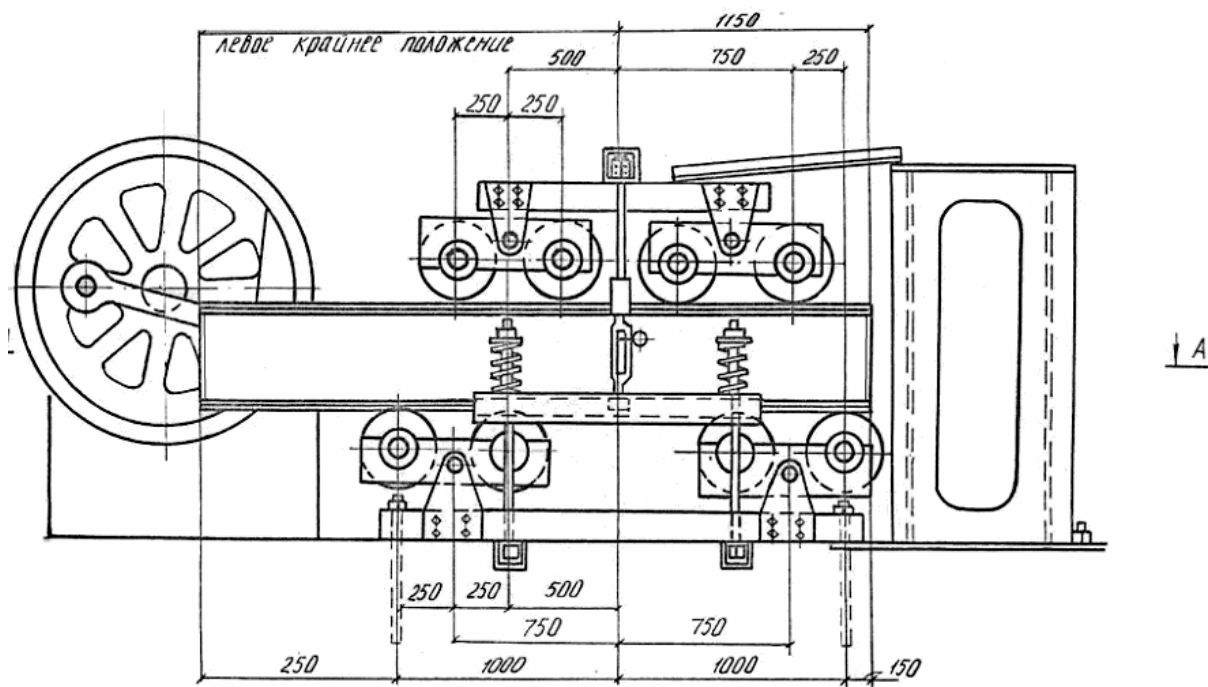


Рис. 2.4. Модернизированный стенд для испытаний балок на выносливость

Ввиду того, что нижний кран имел большую базу, блок испытываемых балок изгибался выпуклостью вниз (положительная кривизна) и на напряжённое состояние от изгиба накладывались циклические колебания локальных напряжений. Стенд стал работать намного спокойнее, рельсы стали реже ломаться, эксцентриситеты установки рельсов сохранялись, шум уменьшился.

Была улучшена система регистрации количества циклов – на предприятии ПКО «Эра» (в Пензе) был запроектирован и изготовлен специальный

магнитный счётчик, использующий геркон, а на балках закреплялись 2 магнита на определённом расстоянии, так что каждый цикл прокатывания колёс регистрировался. Кроме того, это устройство служило дополнительной защитой от внезапных поломок – изменение магнитного зазора вызывало управляющий сигнал, отключающий питание стенда, то есть автоматическая работа стенда стала более надёжной.

Такой стенд работал до 8 мая 2005 г, когда он был модернизирован (рис.2.5) в очередной раз и запущен для испытания неразрезных балок [41, 42, 104]. Актуальность испытаний неразрезных балок чрезвычайно высокая – до этого их испытания на выносливость никем не проводились.

В настоящее время существует чёткая граница – возникновение усталостной трещины в подкрановой балке. В соответствии с действующими нормами во избежание аварии, обрушения «Госгортехнадзор» останавливает эксплуатацию балок с трещинами или ограничивает грузоподъёмность мостовых кранов. *Эксплуатация подкрановых балок с трещинами увеличивает вероятность обрушения подкрановой балки вместе с мостовым краном, транспортирующим, например, жидкую сталь (температура 1350° С).*

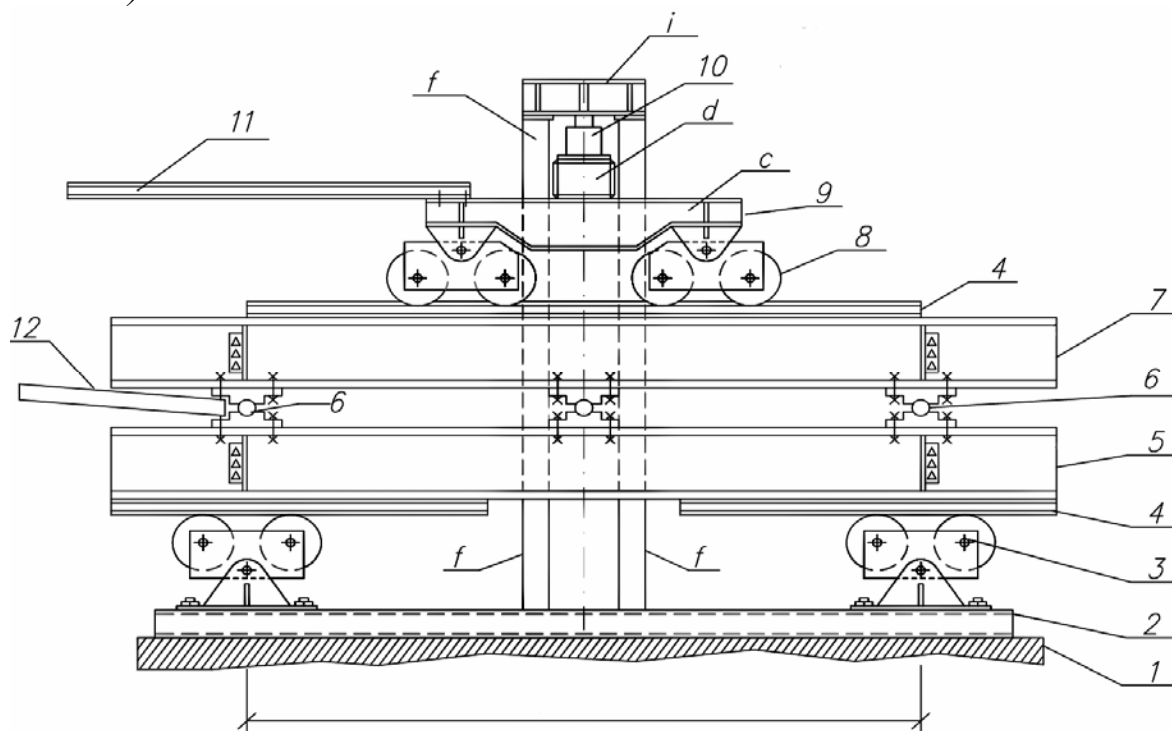


Рис. 2.5 Стенд для испытания неразрезных двухпролётных балок:  
 1 – фундамент; 2 – анкерные болты; 3 – балансирные тележки;  
 4 – направляющие рельсы; 5 – нижние пары испытываемых двухпролётных балок; 6 – цилиндрические шарниры; 7 – верхние пары испытываемых двухпролётных балок; 8 – балансирные тележки верхнего восьмиколёсного крана; 9 – рама верхнего крана; 10 – гидродомкрат; 11 – горизонтальные анкерные устройства, фиксирующие верхний кран; 12 – шатун, обеспечивающий возвратно-поступательные движения испытываемой связки балок; *c* – рама верхнего крана; *d* – коробчатая балка, соединяющая концевые; *f* – анкерные колонны; *i* – короткая балка, соединяющая анкерные колонны

В 80-х годах прошлого века в Новосибирске под руководством В.В. Бирюлёва на заводе им. Кузьмина был построен стенд по патенту К.К. Нежданова [44] (рис.2.6). Этот стенд имеет высокую надёжность, высокую производительность, имеет несколько степеней защиты от непредвиденных ситуаций и работает в автоматическом режиме.

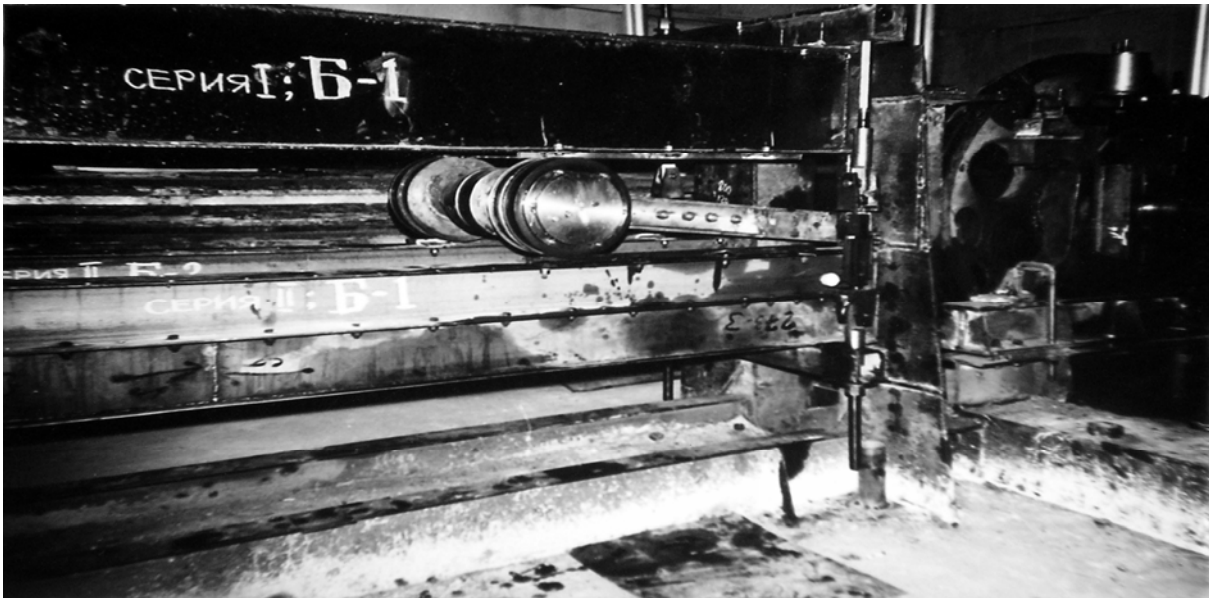


Рис. 2.6. Стенд для испытания балок в г. Новосибирск (по патенту К.К. Нежданова №0840679)

На этом стенде Б.Н. Васютой [40] были произведены оригинальные испытания на выносливость подкрановых балок с верхней сменной частью из прокатных двутавровых профилей. Такая замена благоприятно сказалась на выносливости подрельсовой зоны (усталостные трещины стали появляться при циклических локальных напряжениях, больших в 1,5...2 раза). Испытания Васюты Б.Н. *подтвердили* ранее проведённые испытания К.К. Нежданова.

В течении нескольких лет (3...4 года) ЦНИИСК им. Кучеренко (В.М. Горпинченко) и ЦНИИПСК (В.Ф. Беляев) заказывали испытания в Пензенском ИСИ на кафедре «Строительные конструкции». Чумаков В.А., Васюта Б.Н. [40] испытывали в Пензе серию балок под руководством В.В. Бирюлёва, И.И. Крылова, К.К. Нежданова.

Чумаков В.А. [46] занимался исследованием усиления сварных балок, но качество шва получалось низкое, концентрация напряжений высокая и в испытаниях это было хорошо видно. Элементы усиления иногда даже отделялись от балки и падали. *Усиление на сварке может быть применено как временное решение.* Эксплуатация подкрановых балок с усталостными трещинами не допускается [1], *однако нормативы часто нарушаются.*

По мере накопления циклов прокатываний колёс кранов скорость роста трещин **увеличивается**, и они могут развиваться, сливаться друг с другом



и достигать больших размеров. Слияние трещин друг с другом приводит **критической аварийной ситуации**. Связь стенки балки с поясом разрывается и при нахождении одного из колёс крана над трещиной вероятность локальной потеря устойчивости катастрофически растёт, стенка теряет устойчивость, затем теряет устойчивость верхний пояс и вероятность **обрушения балки вместе с краном катастрофически растёт**.

Вероятность *внезапного* события увеличивается с уменьшением толщины стенки и верхнего пояса.

Вероятен следующий сценарий. Так на Череповецком металлургическом комбинате «Северсталь» используются краны грузоподъёмностью до 560 т, которые движутся по рельсам на подкраново-подстропильных фермах пролётом 36 м. По средним рядам колонн на одном пролёте такой фермы может одновременно находиться до четырёх кранов грузоподъёмностью по 560 т.

Усталостные трещины в подкраново-подстропильных фермах развиваются в нижних растянутых поясах, поэтому при чрезмерном развитии трещины вероятно хрупкое разрушение растянутого пояса и обрушение четырёх кранов вместе с жидкой сталью, находящейся в ковшах. При этом вероятен разлив большого количества стали (1000 т). Такое количество стали способно повредить одну или несколько колонн цеха и вызвать локальное обрушение.

Инцидент разлива стали (но без обрушения) произошёл 23 марта 2004 г. в г. Череповце. В результате обрыва троса и падения ковша сталь разлилась на площади 400 м<sup>2</sup> и привела к человеческим жертвам, что указывает на крайнюю необходимость всеми средствами предотвращать вероятность таких аварий.

Сварные балки изготавливают на автоматических поточных линиях [14, с.387] (рис.2.7), что облегчает процесс их сборки. К сожалению, живучесть сварных подкрановых балок *низкая*. Актуальность повышения выносливости подкрановых балок и выносливости подкраново-подстропильных ферм высокая.

Подкрановые балки с поясами из уголкового профиля также следует изготавливать на автоматической поточной линии [14, с.387] (рис.2.7). Автоматизация изготовления облегчается при использовании высокоресурсных соединений легированными шпильками из стали 40 X «Селект». Винтовые рифы на шпильках следует накатывать по правой или левой спирали однозаходной или многозаходной в клети прокатного стана с поперечной косою накаткой, как из сплошных стержней, так и трубчатых. Патент на такую винтовую арматуру получен недавно [106]. Гарантированная затяжка гаек на шпильках гайковёртом обеспечивает надёжную слитную работу соединений без проскальзывания одного элемента относительно другого. Очевидно, что отверстия в соединяемых деталях должны быть соосны, что легко достигается развёрткой отверстий в сборке на проектный диаметр.

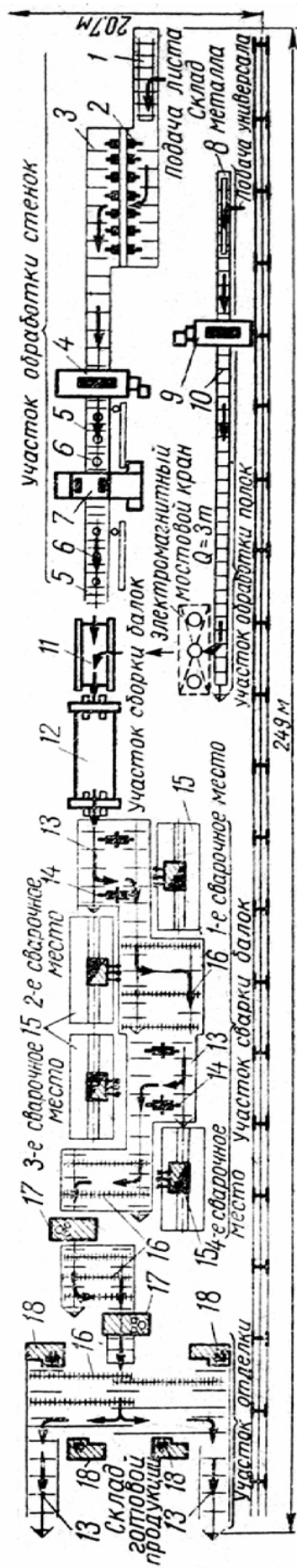


Рис. 2.7. Схема автоматической поточной линии на заводе им. Бабушкина

1 – рольганг; 2 – рычажный кантователь; 3 – рольганг; 4 – листопрямительные вальцы; 5 – рольганг; 6 – манипулятор; 7 – дисковые и кромко-крошительные ножницы; 8 – рольганг; 9 – листопрямительная машина; 10 – рольганг; 11 – питатель; 12 – сборочный стан; 13 – рольганг; 14 – электромагнитный кантователь; 15 – участок сварки поясных листов; 16 – подёмно-поперечные рольганги; 17 машина выправления гнбовидности полок; 18 – скоростные торцефрезерные станки

### 3. ИСПЫТАНИЯ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК НА ВЫНОСЛИВОСТЬ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИХ КОНСТРУКЦИИ

#### 3.1. Испытания на выносливость сварных подкрановых балок

##### Запись осциллограмм

В 80-х годах проводились испытания сварных подкрановых балок на выносливость на базе 4 миллионов циклов колебаний локальных напряжений в подрельсовой зоне. Линии регрессии строились в зависимости от сдвигающих напряжений  $\tau_{2\max}$ , действующих с отнулёвыми циклами.

##### Стенд для испытаний балок на выносливость

Стенд для испытания подкрановых балок на выносливость содержит нижний восьмиколёсный кран, обращённый колёсами вверх и неподвижно закреплённый на фундаменте. Стенд предназначен для испытаний блока из двух балок длиной по 3 м, которые объединены друг с другом системой связей и талрепов. На каждой из балок блока на их поясах неподвижно смонтированы и закреплены рельсы. Крепления рельсов выполнены болтами М16. Блок из пары балок опирается через рельсы на обращённые вверх колёса нижнего восьмиколёсного крана.

На обращённые вверх рельсы блока балок опираются колёса верхнего восьмиколёсного крана. Модели двух восьмиколёсных кранов стянуты друг с другом с расчётным усилием и зажимают между колёс четыре модели испытываемых балок.

На фундаменте также смонтирована жёсткая рама нижнего восьмиколёсного крана, обеспечивающая неподвижность его относительно фундамента. Испытываемым балкам сообщают горизонтальные возвратно-поступательные продольные колебания с размахом 700 мм кривошипно-шатунным механизмом (рис.3.1–3.3).

В качестве маховика используется колёсная пара массой 3,5 т от паровоза «Серго Орджоникидзе». Шатун от паровоза, сообщает испытываемым на выносливость подкрановым балкам, возвратно-поступательные колебания.

Каждая пара колёс крана образует балансирную тележку. Испытуемые балки зажаты с проектным усилием между восемью колёсами верхнего крана и восемью колёсами нижнего крана. Асимметрию регулируют изменением схемы опирания балок. Длина балок – 3 м.

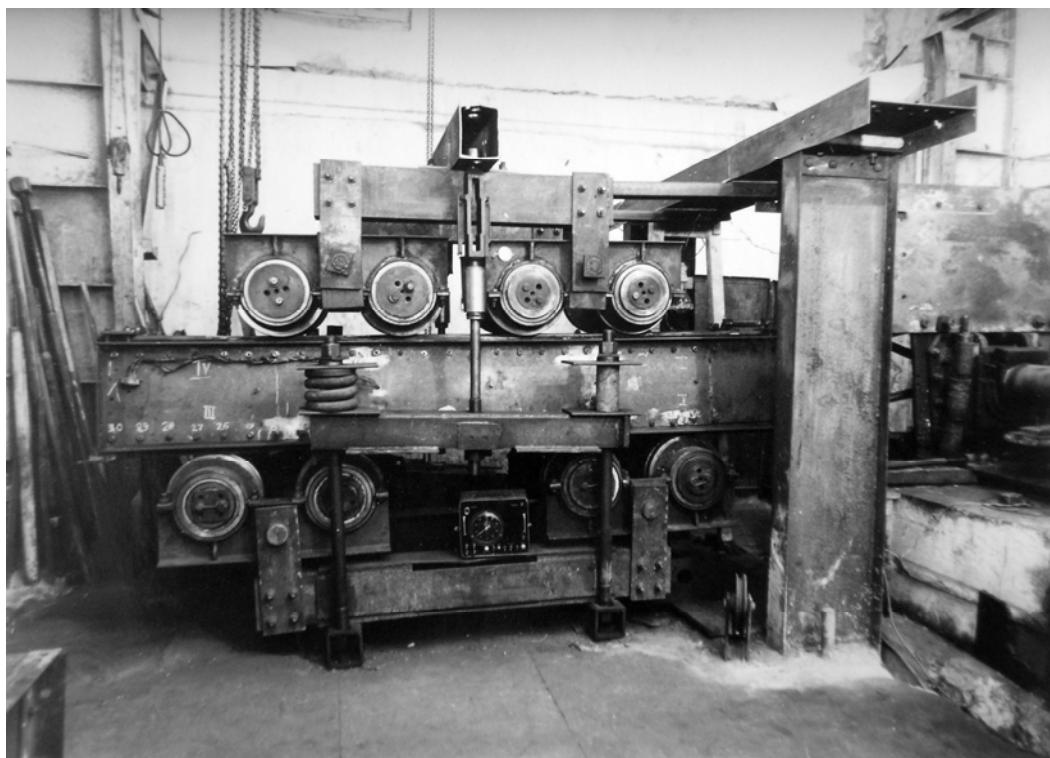


Рис. 3.1. Стенд для испытаний блока из двух балок на выносливость восьмиколёсными мостовыми кранами

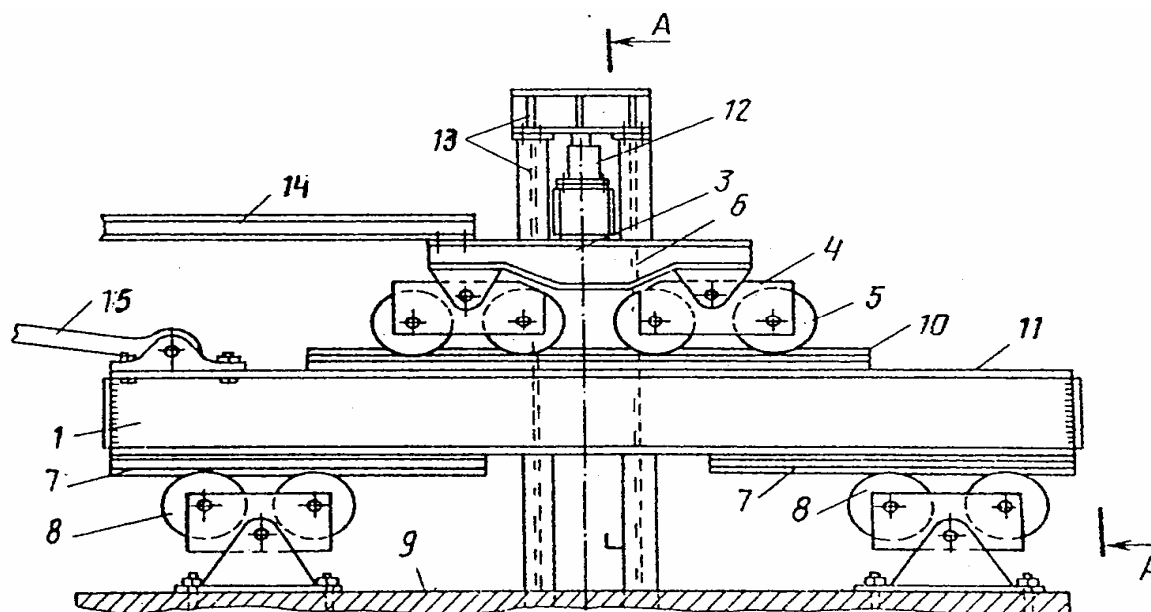


Рис. 3.2. Схема стенда для испытаний моделей подкрановых балок на выносливость двумя восьмиколёсными кранами. Длина балок 3 м.

Размах возвратно-поступательных колебаний 700 мм:

1 и 2 – блок из пары испытуемых балок; 3 – рама модели верхнего восьмиколёсного крана; 4 – балансирные тележки колёс; 5 – колёса балансирных тележек; 6 – шарниры балансиров; 7 – нижние рельсы (крепления не показаны); 8 – колёса балансирных тележек; 9 – фундамент; 10 – верхние рельсы (крепления не показаны); 11 – верхние пояса балок; 12 – гидродомкраты, создающие нагрузку; 13 – жёсткие опоры; 14 – горизонтальные связи, фиксирующие верхний восьмиколёсный кран в проектном положении; 15 – шатун, шарнирно соединённый с балками

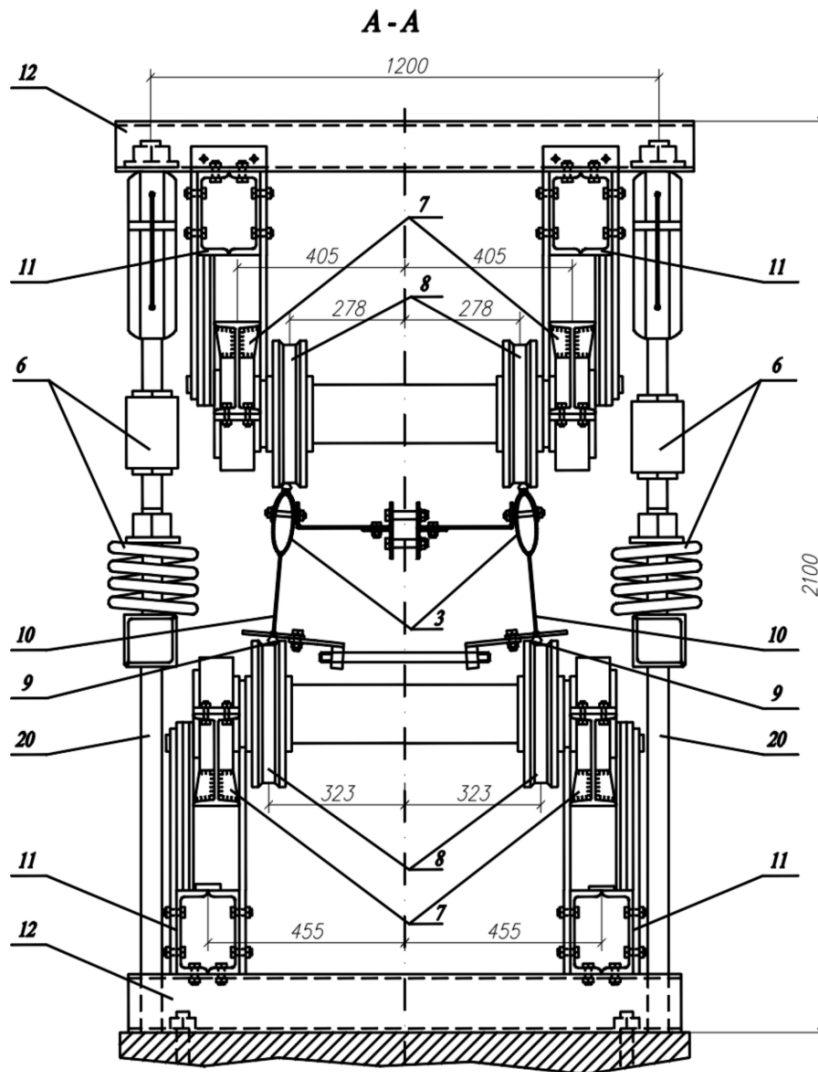


Рис. 3.3. Стенд для испытаний моделей подкрановых балок на выносливость  
разрез А-А:

- 1 – блок испытуемых балок 2 – балка; 3 – рама,  
4 – колёса балансирных тележек; 5 – колёса; 6 – шарниры; 7 – нижние рельсы;  
8 – колёса балансирных тележек; 9 – фундамент; 10 – верхние рельсы;  
11 – верхние пояса балок; 12 – гидродомкраты; 13 – опоры;  
14 – горизонтальная связь

Нижний восьмиколёсный мостовой кран обращён колёсами вверх. Блок из двух балок зажат между верхним и нижним восьмиколёсными мостовыми кранами. Возвратно-поступательные колебания блоку из двух балок сообщают кулисным механизмом возвратно-поступательного действия (размах колебаний 700 мм, амплитуда 350 мм).

Испытываемым балкам сообщают горизонтальные возвратно-поступательные продольные колебания с размахом 700 мм кривошипно-шатунным механизмом.

### Экспериментальные балки

Испытываемые балки изготовлены из малоуглеродистой стали ВСтЗсп5 по ГОСТ 380-71. Сталь использовалась одной партией для гарантии однородности. Пояса, стенки и рёбра жёсткости изготавливались резкой на гильотинных ножницах. Сварка всех балок выполнялась одним сварщиком полуавтоматом постоянного тока А-537 в среде углекислого газа проволокой Св-08-2Г2С (ГОСТ 2246-70) диаметром  $\varnothing 1,6$  мм при подаче её со скоростью 453 мм/мин и напряжением 32...35 вольт.

Длина всех балок одинакова – 3000 мм. Для проведения испытаний изготовлены двутавровые балки типов – Б1, Б2, Б7.

Балки типа Б1 – сварной симметричный двутавровый профиль. Рёбра жёсткости приварены с шагом 600 мм. Балки этого типа имели различное поперечное сечение.

Балки №1 и №2 состояли из поясов  $150 \times 12$  мм и стенки  $400 \times 6$  мм (гибкость стенки  $\lambda=66,7$ ) (рис. 3.4, верх). Верхние пояса строгались и доводились до толщины 12 мм. Рёбра жёсткости приваривались к верхнему поясу и стенке балки, для пропуска поясного шва у рёбер срезался угол  $15 \dots 20$  мм. Ширина рёбер равнялась половине пояса. Балки №3...9 (рис. 3.4, низ) имели сечение пояса  $150 \times 8$  мм, а стенки  $300 \times 4$  мм (гибкость стенки  $\lambda=75$ ) Пояса этих балок не строгались. Габариты и расположение рёбер жёсткости такие же, как и в балках №1 и №2.

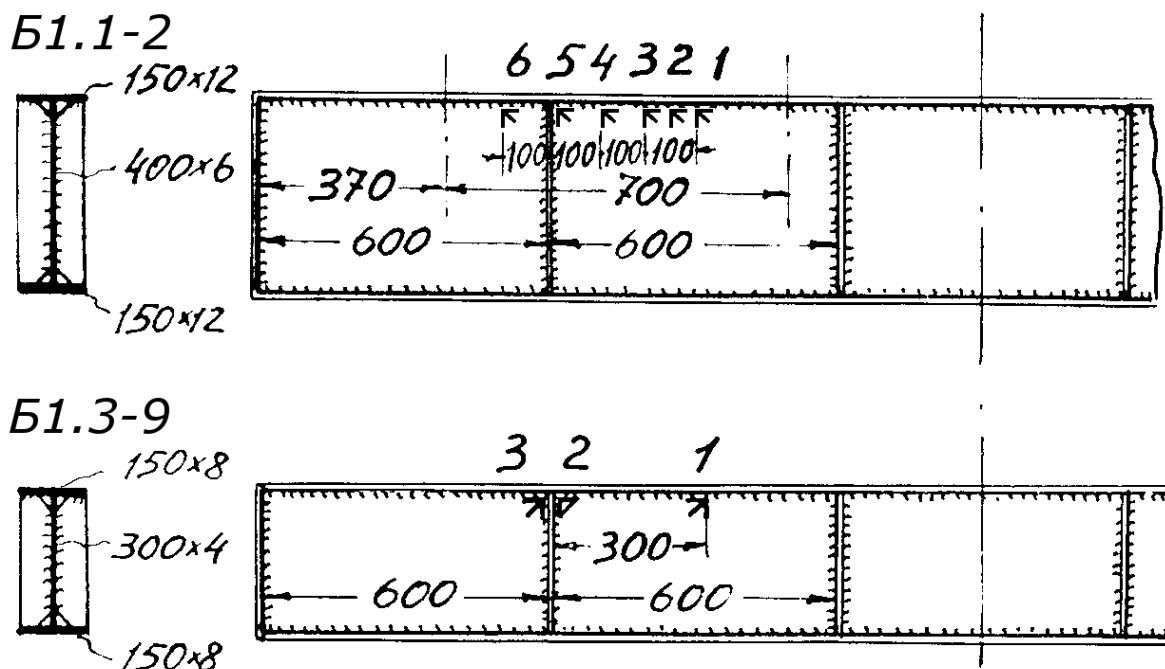


Рис. 3.4 Схема наклейки тензорезисторов на балках типа Б1

Балка типа Б2 отличалась от балка типа Б1.1 тем, что дополнительно оснащалась продольным ребром жёсткости по всей длине, а кроме того – дополнительными промежуточными рёбрами жёсткости с шагом 100 мм, выше продольного ребра.

Балка типа Б7 отличалась от балка типа Б1.1 только более частым шагом рёбер жёсткости – 200 мм.

На всех балках швы выполнялись с проваром на всю толщину стенки, с вогнутой поверхностью. Рельсы применялись цилиндрические и закреплялись накладками вне зоны действия колёс.

По мере износа рельсов напряжённое состояние в балках изменялось (напряжения увеличивались). На рис. 3.5 показаны локальные напряжения в балке Б1.1 при центральной сжатии, при неизношенном рельсе. На рис. 3.6 – то же, при износе рельса на 25 % от диаметра.

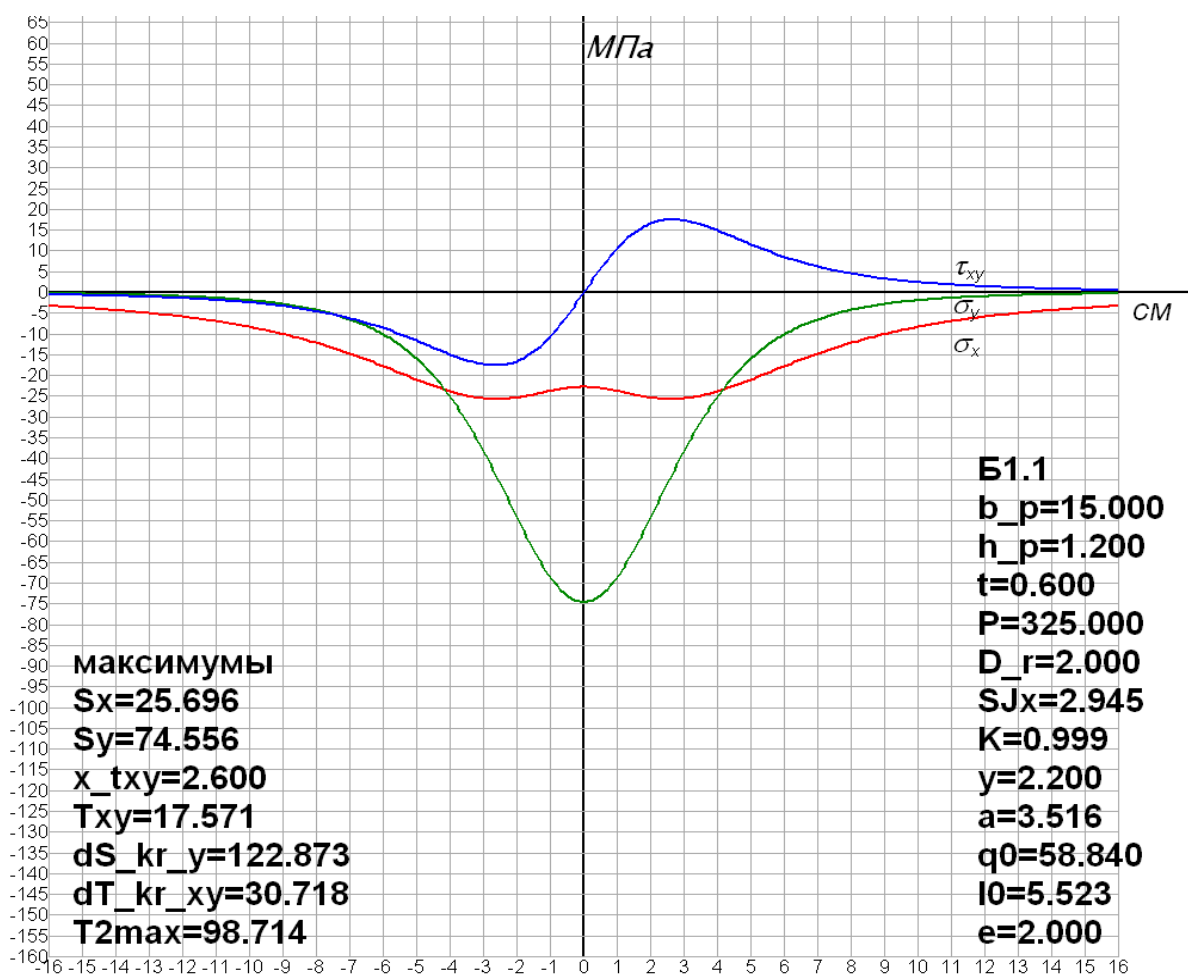


Рис. 3.5. Колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне балки Б1.1 без учёта износа рельса

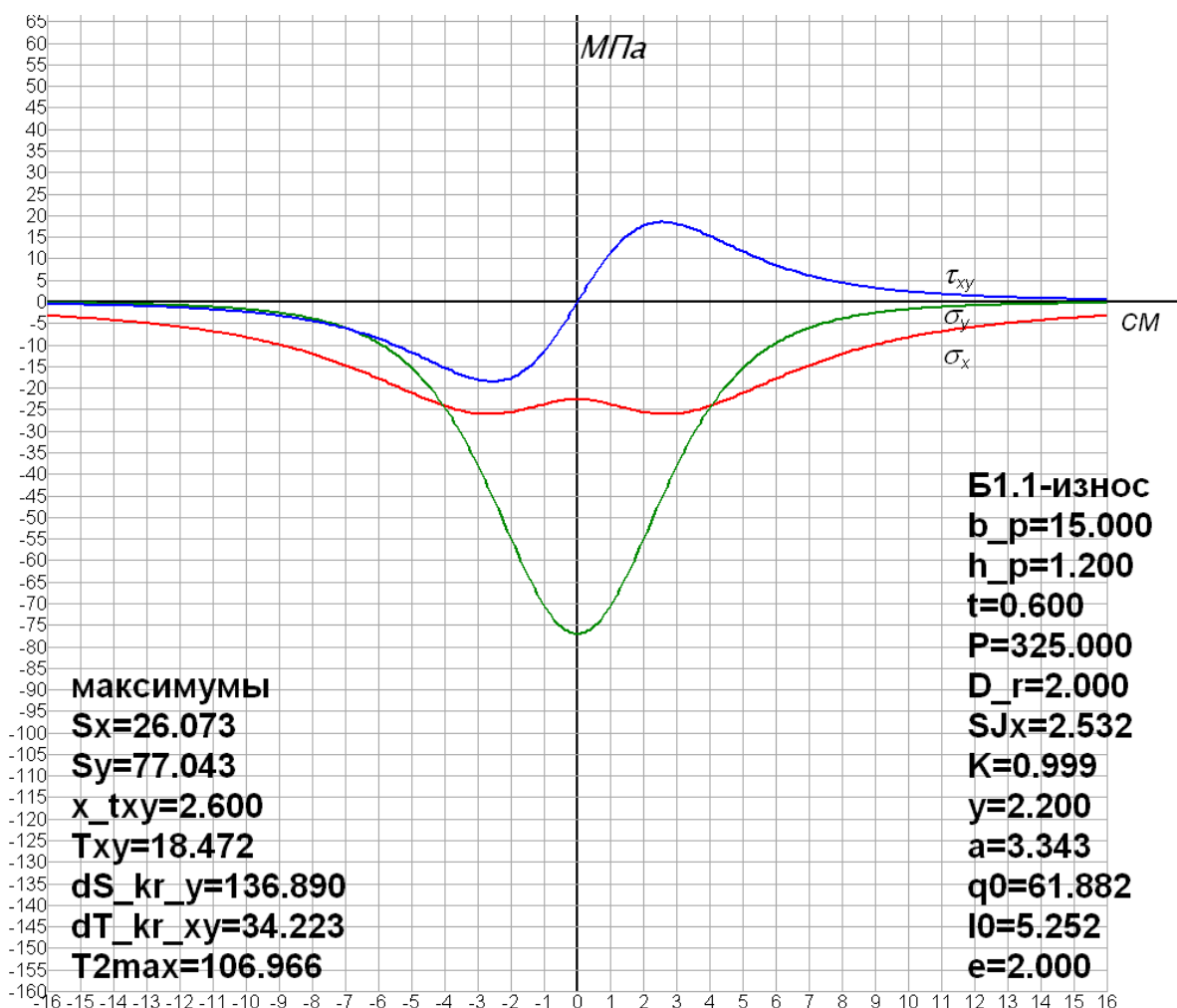


Рис. 3.6. Колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне балки Б1.1 при 25% износе рельса. Износ рельса приводит к увеличению колебаний всех локальных напряжений. Очевидно, что рельсы должны быть износостойкими

На каждом из рис. 3.5 и 3.6 справа перечислены исходные данные для расчёта:  $b_p$  – ширина пояса;  $h_p$  – толщина пояса  $t_p$ ;  $t$  – толщина стенки  $t_{ст}$ ;  $P$  – сила давления колеса;  $D_r$  – диаметр рельса круглого сечения;  $\Sigma J_x$  – сумма моментов инерции рельса и верхнего пояса  $\Sigma J_x$ ;  $K$  – коэффициент анизотропии;  $y$  – глубина, для которой производится расчёт, от точки контакта рельса и пояса;  $a$  – высота эквивалентной полосы полуплоскости, заменяющей при расчёте рельс и верхний пояс  $a = \frac{2P}{\pi q_0}$ ;  $q_0$  – контактная

нагрузка, передающаяся от рельса на балку в соответствии с формулой Б.М. Бродде;  $l^{loc}$  – длина эффективного распределения контактных напряжений, передающихся от рельса на верхний пояс;  $e$  – эксцентриситет установки рельса на поясе балки.

Слева на рисунках приведены данные об экстремумах локальных напряжений:  $\sum \sigma_x^{loc}$  – максимум циклических локальных напряжений;  $\sigma_x^{loc}$  при цен-



тральном сжатии;  $S_y$  – максимум локальных напряжений  $\sigma_y^{loc}$  при центральном сжатии;  $x_{t_{xy}}$  – ордината относительно колеса, где локальные напряжения  $\tau_{xy}^{loc}$  достигают максимума;  $T_{xy}$  – максимум локальных напряжений  $\tau_{xy}^{loc}$  при центральном сжатии;  $dS_{kr_y}$  – максимум локальных напряжений  $\sigma_{y_{кр}}^{loc}$  при кручении верхнего пояса;  $dT_{kr_{xy}}$  – максимум локальных напряжений  $\tau_{xy_{кр}}^{loc}$  при кручении верхнего пояса;  $T_{2max}$  – максимум локальных напряжений  $\tau_{2max}^{loc} = \frac{\sigma_y^{loc} + \sigma_{y_{кр}}^{loc}}{2}$ .

Глубина  $y$  при расчёте принималась равной толщине верхнего пояса плюс 1 см, для учёта смещения наклейки розетки тензорезисторов. Локальные напряжения, возникающие от приложения давления с эксцентриситетом, учитывались по формулам СНиП «Стальные конструкции» [3, с.47].

Как видно, для балок Б1.1, Б1.2 увеличение напряжений вследствие износа рельса были незначительными, поскольку момент инерции верхнего пояса превосходил момент инерции рельса.

На рис. 3.7 показаны локальные напряжения в балке Б1.7 при центральном сжатии, при неизношенном рельсе. На рис. 3.8 – то же, при износе рельса на 25 % от диаметра;  $\sigma_y^{loc}$  – циклические локальные напряжения при центральном сжатии;  $\sigma_x^{loc}$  – циклические напряжения при локальном изгибе;  $\tau_{xy}^{loc}$  – циклические напряжения при локальном сдвиге.

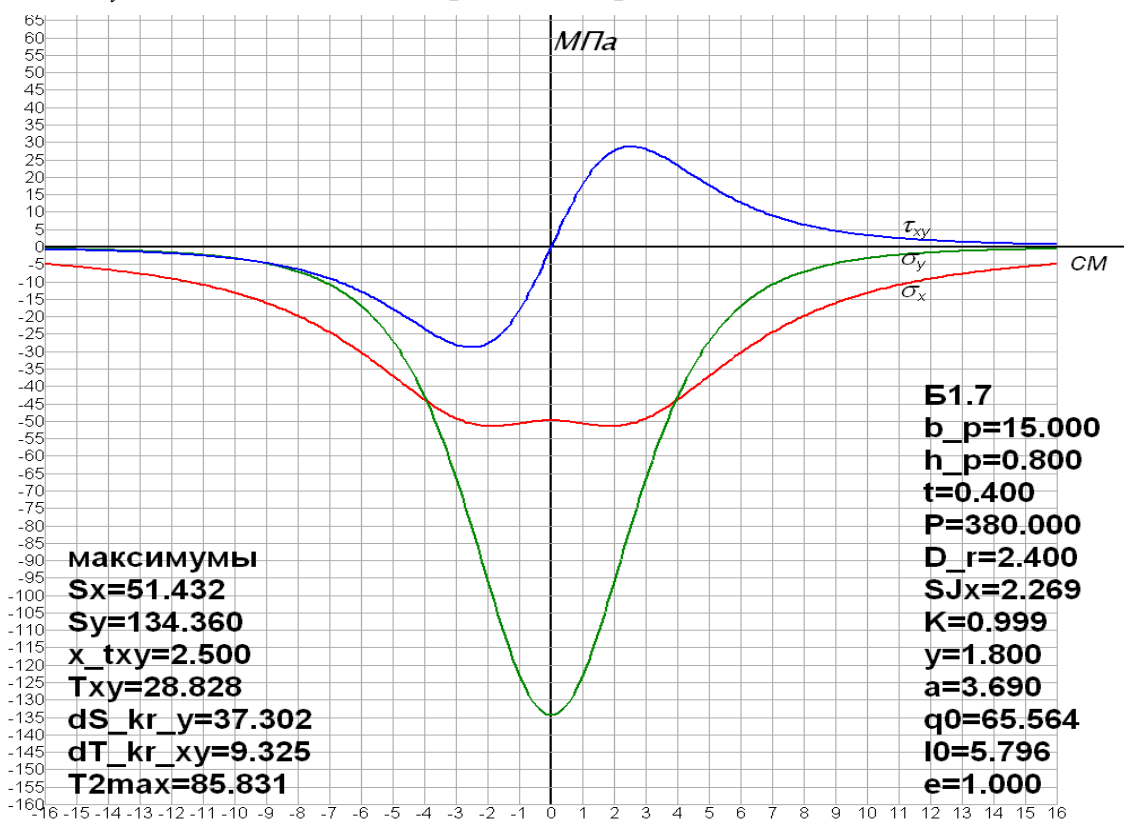


Рис. 3.7. Колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне балки Б1.7 без учёта износа рельса.

Горизонтальная ось – расстояние до колеса, вертикальная – напряжения

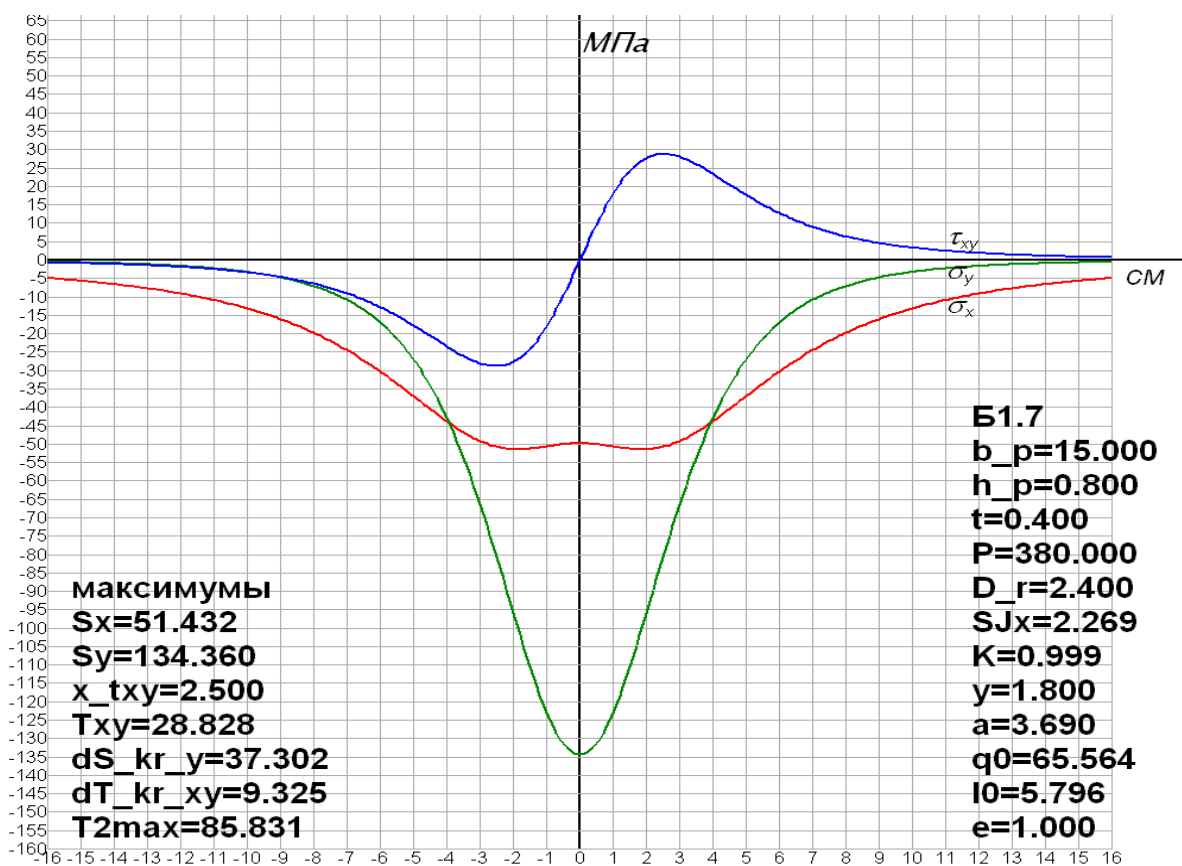


Рис. 3.8. Колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне балки Б1.7 без учёта износа рельса

Нормальные локальные напряжения  $\sigma_y^{loc}$  достигают экстремума в начале координат, то есть непосредственно под сосредоточенной силой. Нормальные локальные напряжения  $\sigma_x^{loc}$  имеют три экстремума: один в начале координат и ещё два симметрично, на некотором удалении от начала координат; напряжения при локальном сдвиге  $\tau_{xy}^{loc}$  имеют два экстремума симметрично, на некотором удалении от начала координат. Все локальные напряжения  $\sigma_y^{loc}$ ,  $\sigma_x^{loc}$ ,  $\tau_{xy}^{loc}$  затухают до нуля по мере удаления воздействия каждого из колёс крана на достаточное расстояние от начала координат.

На рис. 3.8 показаны локальные напряжения в балке Б7.1 при центральной сжатии, при неизношенном рельсе. На рис. 3.9 – то же, при износе рельса на 25% диаметра.

Запись деформаций производилась с помощью тензорезисторов, наклеенных по схеме на рис.3.4, исходя из предположения, что изменение сопротивления каждого тензорезистора прямо пропорционально относительной деформации поверхности, на которую он наклеен.

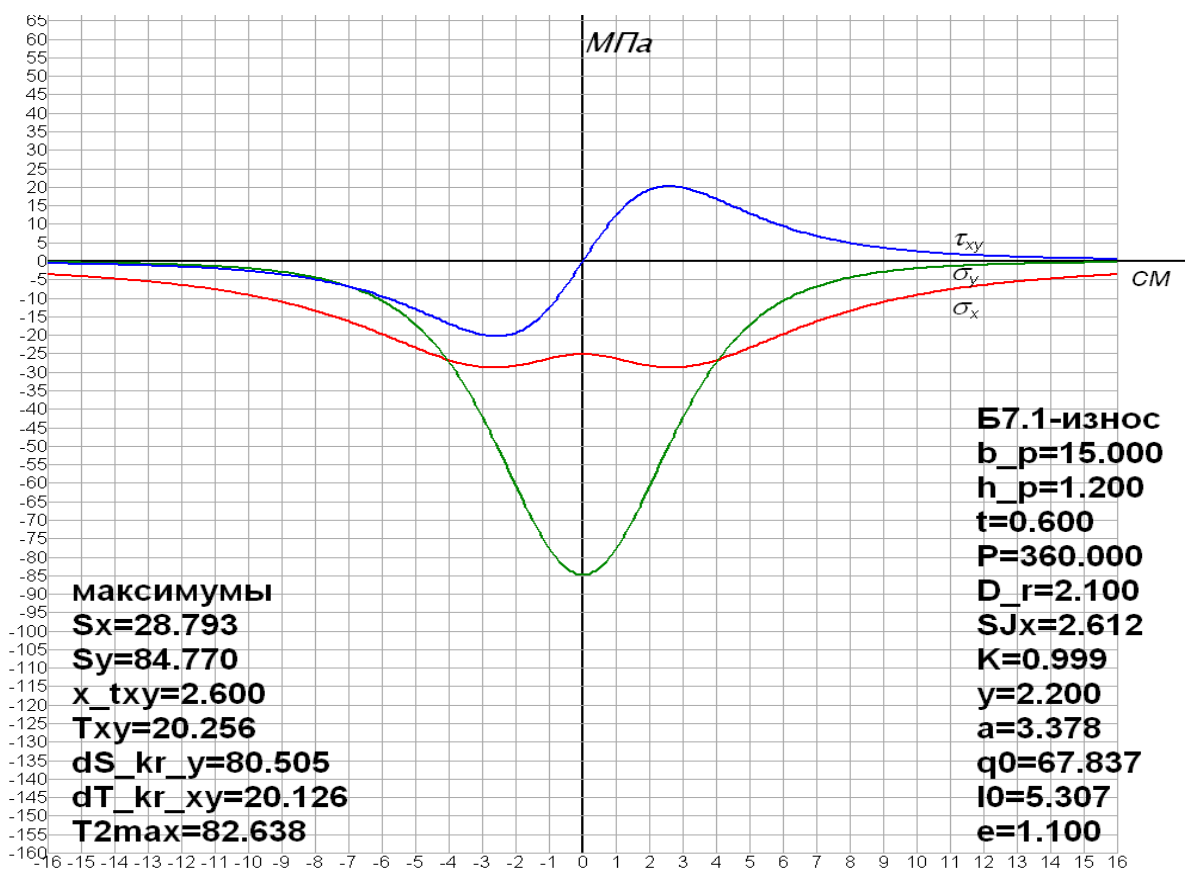


Рис. 3.9. Колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне балки Б1.7 при 25% износе рельса

Запись производилась синхронно с двух розеток, наклеенных на противоположных сторонах стенки балки, что позволяло получить полную картину напряжённого состояния в повреждаемой зоне стенки.

Для обеспечения точности измерений перед снятием показаний с датчиков оборудование тарировалось. Тензорезисторы использовались одной серии. Тензорезисторы наклеивались на тарировочную балочку в зоне чистого изгиба. Тарировочная балочка изгибалась и получала прогиб в середине пролёта, равный 1 мм. Этот прогиб вызывал в зоне чистого изгиба эталонную относительную деформацию  $\epsilon=60 \cdot 10^{-5}$  (60 делений автоматического измерителя деформаций) и производилась запись показаний при данной эталонной деформации  $\epsilon=60 \cdot 10^{-5}$ . Таким образом, тарировке подвергался каждый из 6 каналов записи.

После преобразования полученных экспериментальных результатов в наборы относительных деформаций последние пересчитывались, согласно формулам теории упругости [47, с.134], в величины циклических локальных напряжений:

наибольших касательных 
$$\tau_{1,2\max} = \frac{E}{1+\mu} \sqrt{\frac{(\epsilon_x - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_y - \epsilon_{45})^2}{2}}; \quad (3.1)$$

главных 
$$\sigma_1 = \frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2 \cdot (1 - \mu)} + \tau_{1,2\max} \text{ и } \sigma_2 = \frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{2 \cdot (1 - \mu)} - \tau_{1,2\max}; \quad (3.2)$$

$$\tau_{2\max} = 0,5|\sigma_2|; \quad (3.3)$$

нормальных 
$$\sigma_x = \frac{E(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)}{2 \cdot (1 - \mu^2)} \text{ и } \sigma_y = \frac{E(\varepsilon_y + \mu \cdot \varepsilon_x)}{2 \cdot (1 - \mu^2)}; \quad (3.4)$$

сдвигающих с нормальными осями  $x$  и  $y$  
$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1 + \mu)}(2 \cdot \varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y); \quad (3.5)$$

угол наклона главных площадок 
$$\operatorname{tg} 2\alpha = 2 \frac{\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{45}$  – относительные деформации;  $\mu$  – коэффициент Пуассона. Для малоуглеродистой стали ВСт.3сп.5 с содержанием углерода около 0,3 % принимались: коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ ; модуль упругости  $E = 206000$  МПа; модуль сдвига  $G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = 80100$  МПа [3].

## 4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА БАЛОК НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

### 4.1. Недостатки ранее используемого расчёта

Недостаток ранее применявшейся методики расчёта заключается в завышении пределов выносливости К-образного сварного шва в зоне соединения пояса со стенкой. В действующих нормах [3] предел выносливости  $R_v$  равен 75 МПа. К тому же расчёт проводится на базе 2 миллионов циклов прокатывания колёс. В цехах тяжёлого режима работы 2 миллиона циклов накапливается очень быстро – за  $\approx 3$  года интенсивной эксплуатации. А минимальный безопасный срок службы подкрановых балок при режиме работы 8К,7К – 10 лет [2]. За этот срок накапливается  $\approx 6$  миллионов циклов [3, 41, 42] прокатываний колёс мостовых кранов. Следовательно, минимальный срок эксплуатации балок не гарантируется и можно прогнозировать их досрочный выход из строя.

В настоящее время проверка выносливости затруднена, так как в действующих нормах отсутствуют регрессионные зависимости при симметричных и несимметричных циклах колебаний сдвигающих напряжений. Анализ колебаний локального напряжённого состояния в подрельсовой зоне показывает, что все локальные напряжения взаимозависимы. В своё время линия регрессии строилась по анализу зависимости числа циклов сдвигов и величины наибольших сдвигающих напряжений  $\tau_{2\max}^{loc}$ , действующих с *отнулёвыми* циклами. Отнулёвые циклы возникают на площадке, параллельной сварному шву и пересекающей поверхность стенки под углом  $45^\circ$ . Возможно построение линии регрессии в зависимости от сдвигающих напряжений  $\tau_{xy}^{loc}$ , действующих с *симметричными* циклами. Была поставлена задача – получить такую регрессионную зависимость.

### 4.2. Построение регрессионной зависимости числа циклов колебаний до появления усталостных трещин от амплитуд симметричных циклов сдвигающих циклических локальных напряжений

В качестве исходных данных для статистической обработки возьмём экспериментальные результаты, полученные различными учёными в разное время. Для получения значений амплитуд колебаний сдвигающих напряжений с симметричными циклами использованы результаты исследований, опубликованные ранее [39]. Сдвигающие напряжения  $\tau_{xy}^{loc}$  составляют примерно 0,24 от напряжений  $\sigma_y$ . Сдвигающие же напряжения  $\tau_{2\max}^{loc}$

составляют 0,5  $\sigma_y$ . Таким образом, сдвигающие напряжения  $\tau_{xy}^{loc}$  составляют примерно 0,48 от  $\tau_{2max}^{loc}$ .

Первая группа испытаний – это испытания крупных моделей сварных балок с К-образными швами в подрельсовой зоне в лаборатории «Выносливости подкрановых балок» на стенде, имитирующем воздействия колёс мостовых кранов, при Пензенском государственном университете архитектуры и строительства. К-образные швы выполнялись полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Результаты испытаний и расчёта величины сдвигающих напряжений, действующих с симметричными циклами, приведены в табл.4.1.

Результаты второй группы испытаний взяты из диссертации Горпинченко В.М [38]. Испытания проводились на гидравлическом стенде в ЦНИИСК им. Кучеренко, г. Москва. Сварка балок выполнялась вручную. Результаты испытаний и расчёта сдвигающих напряжений, действующих с симметричными циклами, приведены в табл.4.2.

Третья группа данных являет собой не испытания, а результаты исследований Камбарова В.И. [12], а именно он систематизировал результаты натурных обследований подкрановых балок с тяжёлым режимом работы мостовых кранов в действующих цехах чёрной металлургии. Результаты испытаний и расчёта сдвигающих напряжений, действующих с симметричными циклами, приведены в табл.4.3.

Четвёртая группа – результат экспериментальных испытаний пяти крупных моделей балок с поясами из прокатных двутавровых профилей: четыре модели были испытаны К.К. Неждановым на стенде в г. Пензе [41, 42, 44], а пятая модель испытана Б.Н. Васютой на аналогичном стенде в г. Новосибирске [40] – табл. 4.4.

Для описания характера колебаний сдвигающих напряжений используем амплитудный коэффициент  $A_\tau$  – отношение амплитуды  $\tau_a^{loc}$  к большему по модулю экстремуму напряжений  $\tau_{эктр}^{loc}$ :

$$A_\tau = \frac{\tau_a^{loc}}{\tau_{эктр}^{loc}}. \quad (1)$$

В случае отнулёвых колебаний и при предположении синусоидальной формы колебаний один из экстремумов равен нулю, а второй равен удвоенной амплитуде (рис.4.1). В этом случае амплитудный коэффициент равен  $A_\tau = 0,5$ .

В случае симметричных колебаний экстремумы равны друг другу по модулю и равны амплитуде – амплитудный коэффициент  $A_\tau = 1$ .

Из опыта машиностроения известно, что зависимость напряжений и числа циклов до появления усталостных трещин в диапазоне от 0,3...6 млн

циклов нагружений и более хорошо описывается уравнением прямой в логарифмических координатах:

$$\ln \tau_{A=1K}^{loc} = c + d \ln N,$$

где  $\tau_{A=1K}^{loc}$  – амплитуда колебаний сдвигающих напряжений с симметричными циклами (индекс «К» обозначает – «концентратор напряжений присутствует», то есть присутствует сварной шов);  $N$  – число циклов колебаний до появления усталостных трещин;  $c, d$  – некоторые коэффициенты.

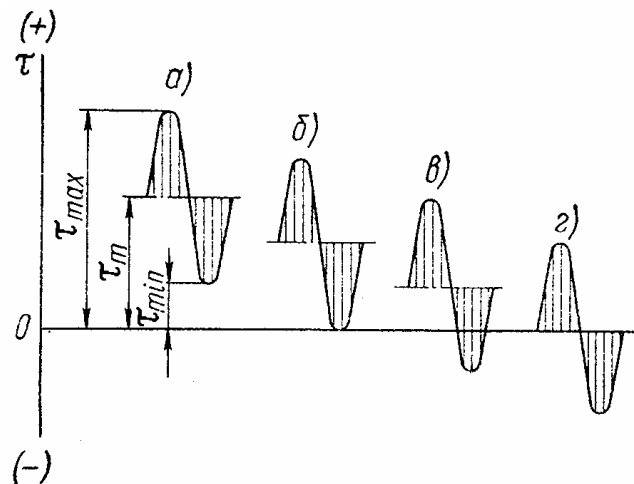


Рис 4.1. Физический смысл амплитудного коэффициента:  
а –  $A_\tau < 0,5$ ; б –  $A_\tau = 0,5$ ; в –  $0,5 < A_\tau < 1$ ; г –  $A_\tau = 1$

Из статистики известно, что коэффициенты  $c$  и  $d$  можно получить регрессионным анализом по следующим формулам [50, 51, 52]:

$$c = \frac{\sum \ln \tau - b_\tau \cdot \sum \ln N}{n}; \quad (3)$$

$$d = \frac{\sum XY}{\sum X^2}, \quad (4)$$

где  $n$  – число испытанных балок;  $X = \ln N - \ln \bar{N}$  – отклонение варианты  $N$  от её средней величины  $\bar{N}$ ;  $Y = \ln \tau - \ln \bar{\tau}$  – отклонение варианты  $\tau$  от её средней величины  $\bar{\tau}$ ;  $\bar{N} = \frac{\sum N}{n}$  – средняя величина варианты  $N$ ;  $\bar{\tau} = \frac{\sum \tau}{n}$  – средняя величина варианты  $\tau$ .

Таким образом, уравнение регрессии, корреляционно связывающее среднее значение величины сдвигающих напряжений с числом циклов до

появления первой усталостной трещины, в общем виде можно записать следующей формулой:

$$\tau_{A=1K}^{\text{loc}} = a_{\tau} N^{b_{\tau}}, \quad (2)$$

где  $a_{\tau} = e^c$ ;  $b_{\tau} = d$ .

Данная регрессионная зависимость характеризуется следующими оценочными коэффициентами:

мера индивидуального рассеяния:

$$\sigma_{\ln \tau / \ln N} = \sigma_{\ln \tau} \sqrt{1 - r^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\ln \tau}$  – среднеквадратичное отклонение варианты  $\tau$ :

$$\sigma_{\ln \tau} = \sqrt{\frac{\sum Y^2}{n - 1}}; \quad (7)$$

$r$  – коэффициент корреляции:

$$r = \frac{\sum X \cdot Y}{\sqrt{\sum X^2 \cdot \sum Y^2}}. \quad (8)$$

Для проверки достоверности построенной линии регрессии оцениваем ошибку коэффициента корреляции  $m_r$ :

$$m_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

Полученная зависимость считается достоверной, если отношение  $r/m_r > 4$  [50, 51, 52].

Построенная линия регрессии является «линией 50 % излома», то есть в среднем при заданном числе циклов мы вычисляем средние сдвигающие напряжения с симметричными циклами, приводящими к возникновению первой трещины. Поскольку мы ставим своей целью *гарантирование* выносливости при заданном числе циклов, мы должны уменьшить получаемое значение  $\tau_{A=1K}^{\text{loc}}$  до величины, *дающей достаточную гарантию выносливости подрельсовой зоны балок*.

Из статистики известно, что в пределах тройного рассеяния  $\pm 3\sigma_{\ln \tau / \ln N}$  будет находиться 99,73 % общего количества случаев. С учётом этого запишем формулу величины предельно допустимых сдвигающих напряжений с симметричными циклами [50]:

$$\tau_{\text{Пред. вын. A=1K}}^{\text{loc}} = e^{\ln \tau_{A=1K}^{\text{loc}} - 3 \ln \tau / \ln N}. \quad (10)$$



Таблица 4.1

## Результаты усталостных испытаний, балки группы 1

N, млн	0,3357	0,3708	0,3847	0,4027	0,433	1,0687	1,4161	1,4795	1,8968	2,001	1,281	0,805	0,61	0,816
τ сИММ	62,4	52,8	60	57,36	55,68	50,4	46,8	46,32	38,4	37,2	39,36	52,32	52,8	51,84
τ отнул	130	110	125	119,5	116	105	97,5	96,5	80	77,5	82	109	110	108
N, млн	3,195	2,939	0,571	4,601	1,701	2,175	1,95	2,6	1,300	1,302	0,702	2,046	1,3	
τ сИММ	32,16	38,4	60	32,16	36,48	37,44	45,6	33,6	38,4	41,28	51,84	33,6	50,88	
τ отнул	67	80	125	67	76	78	95	70	80	86	108	70	106	

Таблица 4.2

## Результаты усталостных испытаний, балки группы 2

N, млн	2,3	2,8	0,55	0,3	0,45	0,55
τ сИММ	39,84	27,8	50,4	66,7	46,1	45,6
τ отнул	83,0	58,0	105,0	139,0	96,0	95,0

Таблица 4.3

## Результаты усталостных испытаний, балки группы 3

N, млн	5,61	5,37	6,29	3,39	3,07	3,88	3,01	5,42	5,30	5,30	4,12	2,11	6,09	4,23	2,40	2,93
τ сИММ	16,1	15,6	20,2	24,0	24,9	24,9	21,7	27,9	10,5	10,1	19,4	24,5	15,9	19,4	27,7	22,8
τ отнул	33,6	32,4	42,1	50,0	51,8	51,9	45,3	58,1	21,8	21,1	40,4	51,1	33,2	40,5	57,8	47,6
N, млн	1,90	1,46	3,12	1,74	3,25	4,48	3,10	6,45	5,13	8,42	7,14	6,98	5,60	8,73	5,12	
τ сИММ	28,5	31,7	26,9	32,2	19,4	15,0	18,9	9,7	13,8	13,3	12,5	14,0	14,4	9,3	21,4	
τ отнул	59,3	66,1	56,1	67,0	40,4	31,3	39,3	28,9	20,3	28,8	26,1	29,2	29,9	19,4	44,6	

Таблица 4.4

## Результаты усталостных испытаний, балки группы 4

N, млн	1,25	1,42	1,74	0,60	5,00
τ сИММ	58,5	53,2	51,1	61,4	51,2
τ отнул	121,9	110,9	106,5	128,0	106,7

Таблица 4.5

## Расчёт коэффициентов линейной регрессии для прокатных балок

Наименование	Обозначение		Группа 1		Группа 2		Группа 3		Группа 4	
	$A_t=1$	$A_t=0,5$	$A_t=1$	$A_t=0,5$	$A_t=1$	$A_t=0,5$	$A_t=1$	$A_t=0,5$	$A_t=1$	$A_t=0,5$
Количество балок	$n$		27		6		33		5	
Расчётное количество циклов	$N_{расч}$		6 000 000							
Суммы										
Квадратов логарифмов	$\sum (\ln \tau_i)^2$	391,56	556,82	86,92	123,59	283,67	442,48	80,287	112,387	
Логарифмов	$\sum \ln \tau_i$	376,99	122,49	22,78	27,186	96,08	120,30	20,032	23,702	
Произведений логарифмов	$\sum \ln \tau_i \cdot \ln N_i$	1429,99	1706,69	308,50	368,36	1462,19	1831,87	285,473	337,808	
Логарифмов	$\sum \ln N_i$	376,99		81,56		503,68		71,304		
Квадратов логарифмов	$\sum (\ln N_i)^2$	5277,71		1112,86		7694,49		1019,198		
Коэффициенты										
Для уравнения $\tau_{A=1}^{loc}$	$a_t$	1692.6	3526.3	1912.2	3983.8	190422	396725	194.2	404.6	
Корреляции	$r$	-0,909		-0,887		-0,801		-0,816		
Показатель степени	$b_t$	-0,260		-0,277		-0,606		-0,089		
Прочие параметры										
Среднеквадратичные отклонения	$\sigma_{\ln \tau}$	0,209		0,288		0,352		0,083		
	$\sigma_{\ln N}$	0,730		0,923		0,465		0,765		
Мера индивидуального рассеивания	$\sigma_{\ln \tau / \ln N}$	0,087		0,133		0,211		0, =0480		
Ошибка коэффициента корреляции	$m_r$	0,033		0,087		0,062		0,1496		
Связь достоверна, так как	$ r/m_r  > 4$	27,3 > 4		10,2 > 4		12,8 > 4		5,5 > 4		

Принимая во внимание, что в половине случаев, не попадающих в полосу тройного рассеяния, выдерживают большее, чем заданное, число циклов.

Недопущение превышения значения предела выносливости  $\tau_{\text{Пред. вын. } A=1K}^{\text{loc}}$ , согласно теории вероятности даёт нам гарантию, что не менее 99,86 % балок выдержат заданное число циклов прокатываний колёс кранов.

Результаты обработки, полученные усталостными испытаниями, приведены в табл. 4.1...4.5.

Линии регрессии и пределы тройных отклонений для симметричных и, аналогично, для отнулёвых колебаний сдвигающих напряжений приведены на рис. 4.2...4.9.

Выносливость балок разных групп легко оценить, взглянув на рисунки, на которых представлены линии регрессии с учётом тройных отклонений – для отнулёвых (рис. 4.10) и симметричных (рис. 4.11) колебаний.

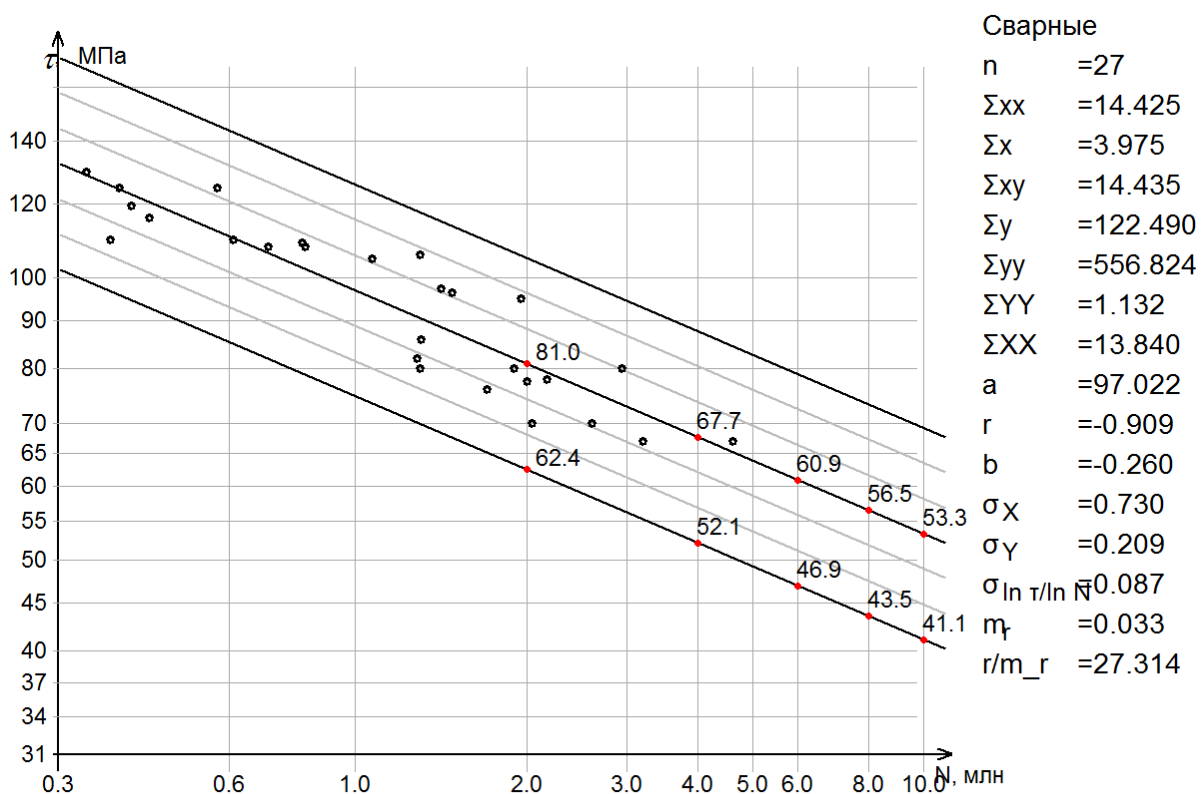


Рис. 4.2. Линия регрессий для отнулёвых колебаний в балках первой группы (по данным К.К. Нежданова, сварные)

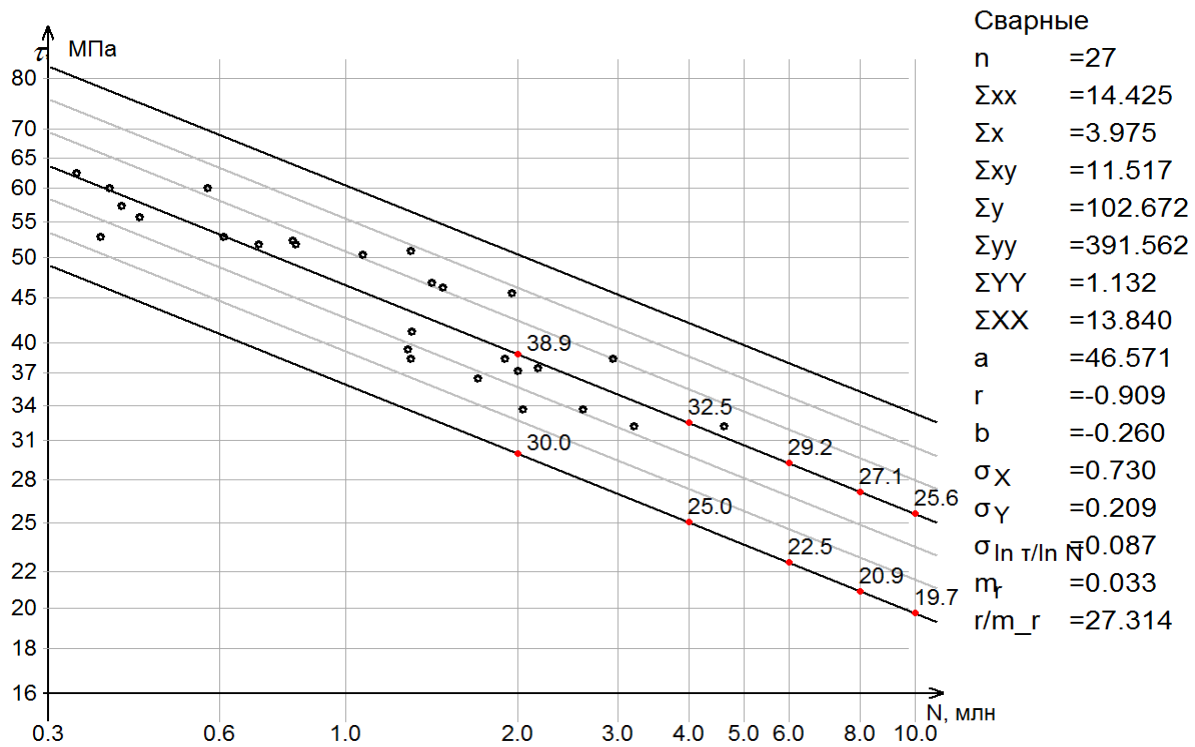


Рис. 4.3. Линия регрессий для симметричных колебаний в балках первой группы (по данным К.К. Нежданова, сварные)

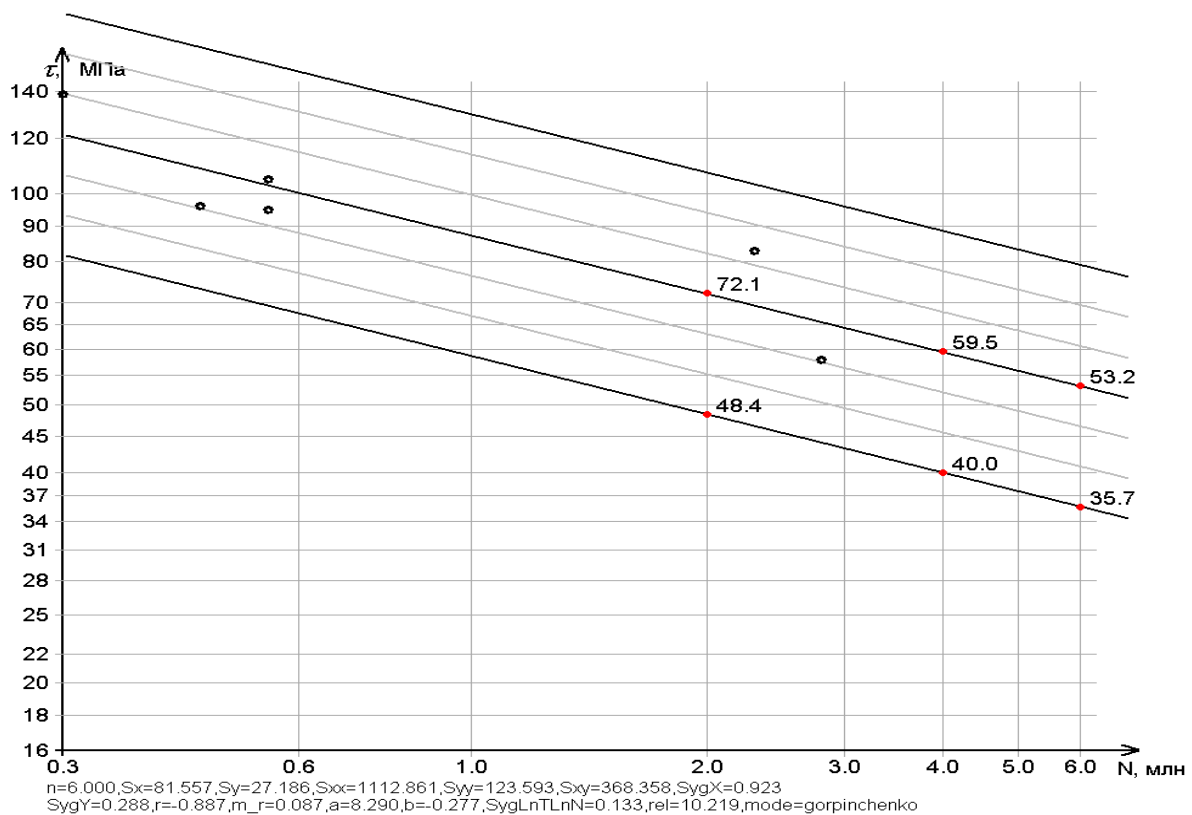


Рис. 4.4. Линия регрессий для отнулёвых колебаний в балках второй группы (по данным В.М. Горпинченко)

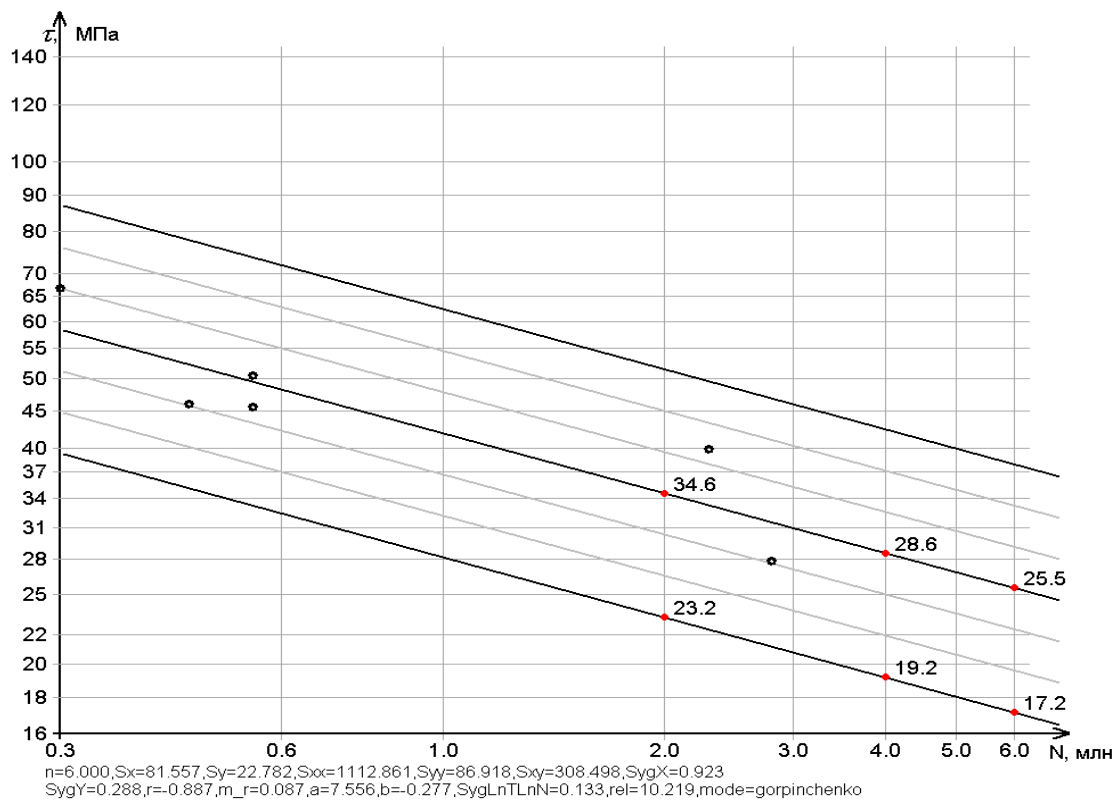


Рис.4.5. Линия регрессий для симметричных колебаний в балках второй группы (по данным В.М. Горпинченко)

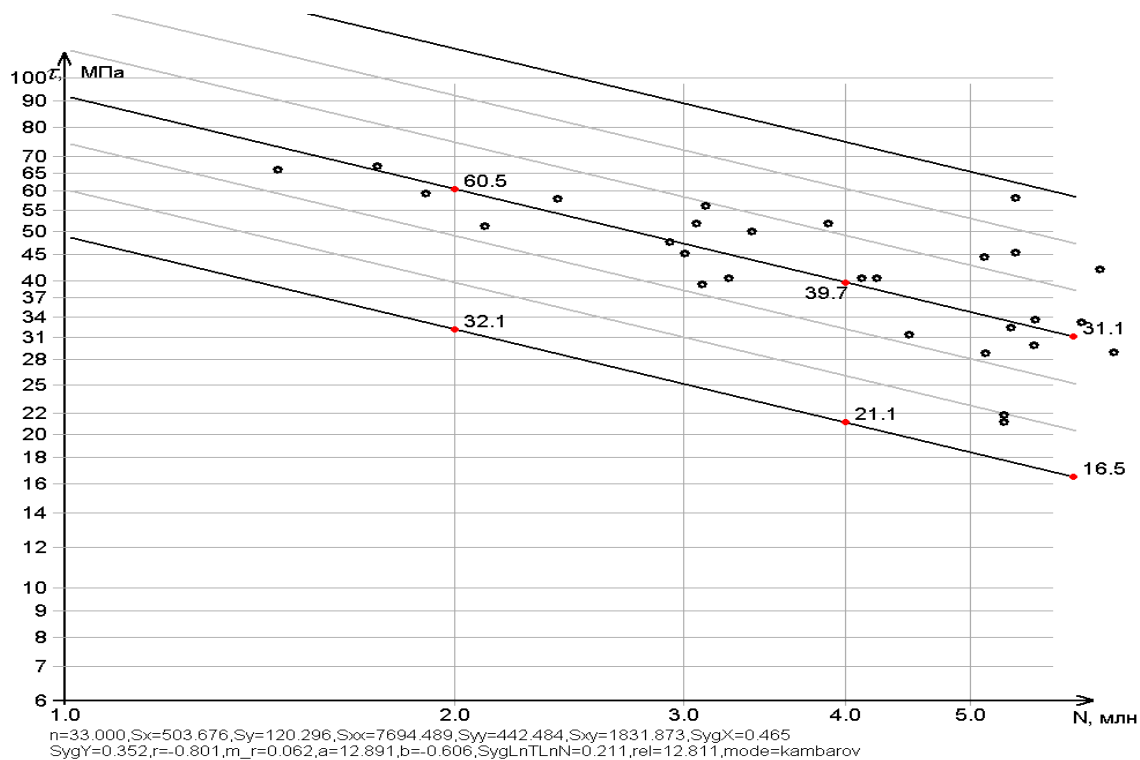


Рис.4.6. Линия регрессий для отнулёвых колебаний в балках третьей группы (по данным В. Камбарова)

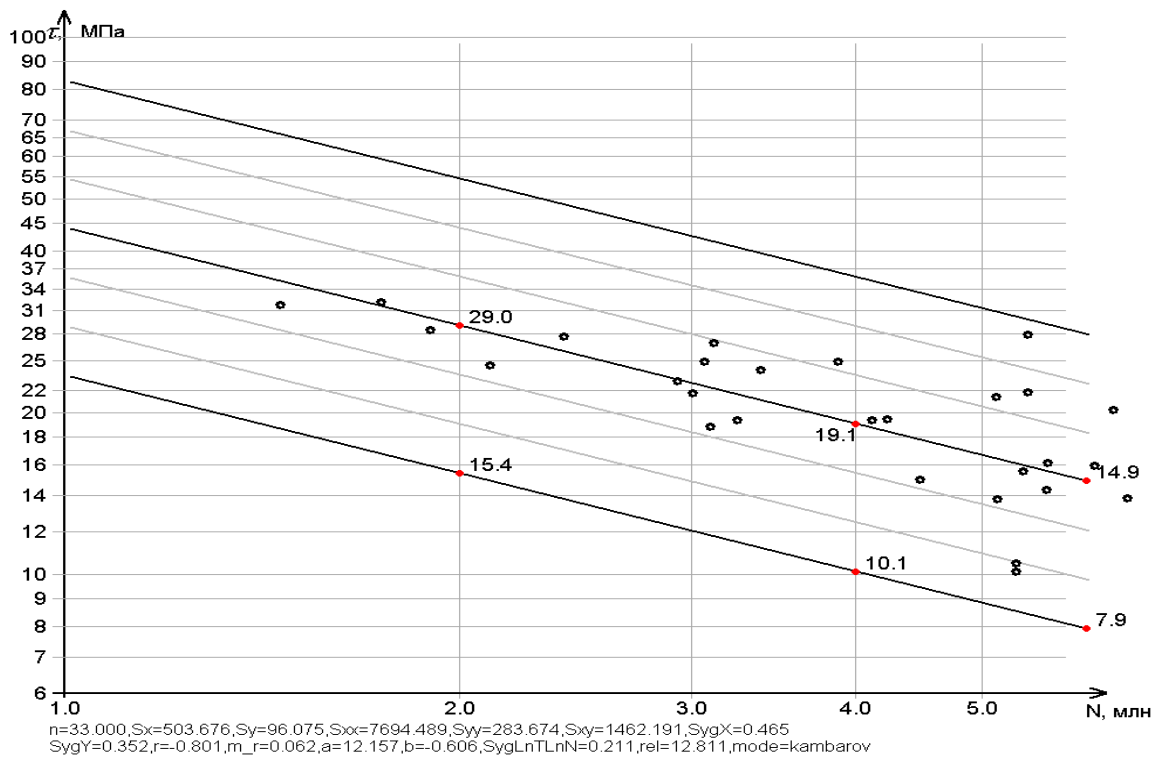


Рис. 4.7. Линия регрессий для симметричных колебаний в балках третьей группы (по данным В. Камбарова)

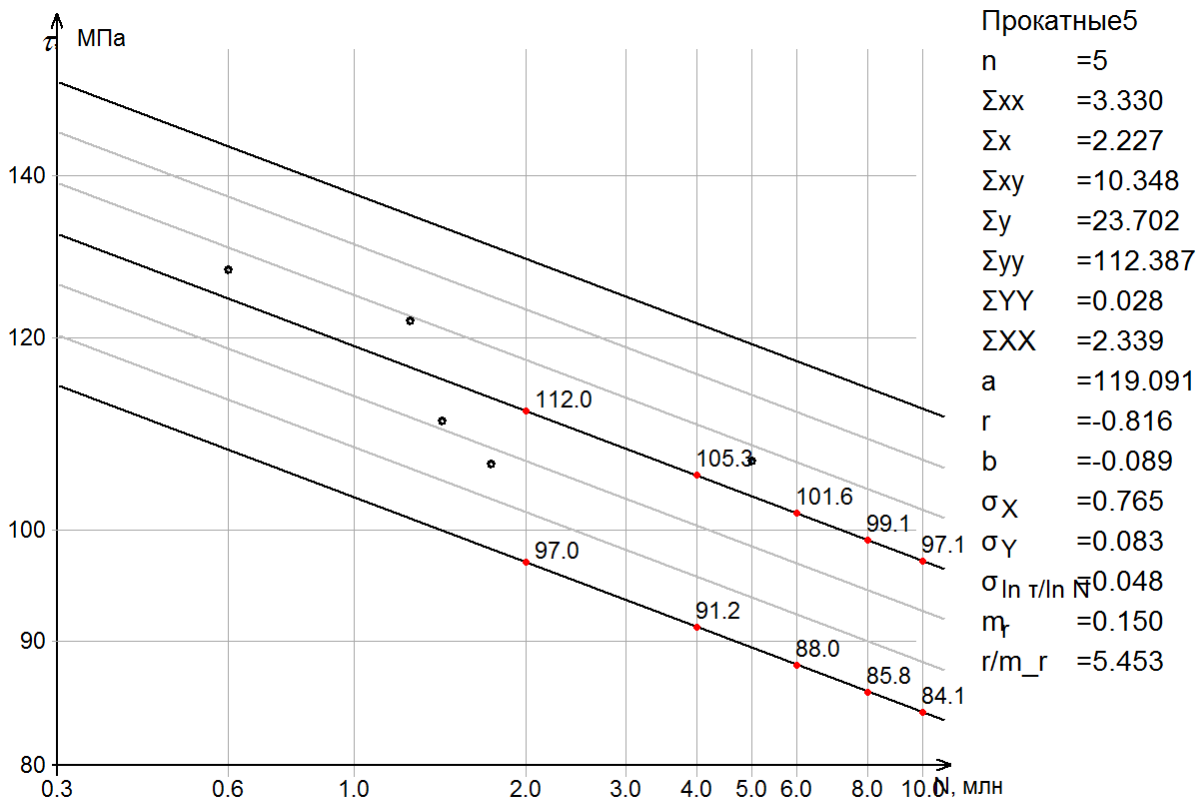


Рис. 4.8. Линия регрессий для отнулёвых колебаний в балках четвёртой группы (по данным К.К. Нежданова, прокатные балки)

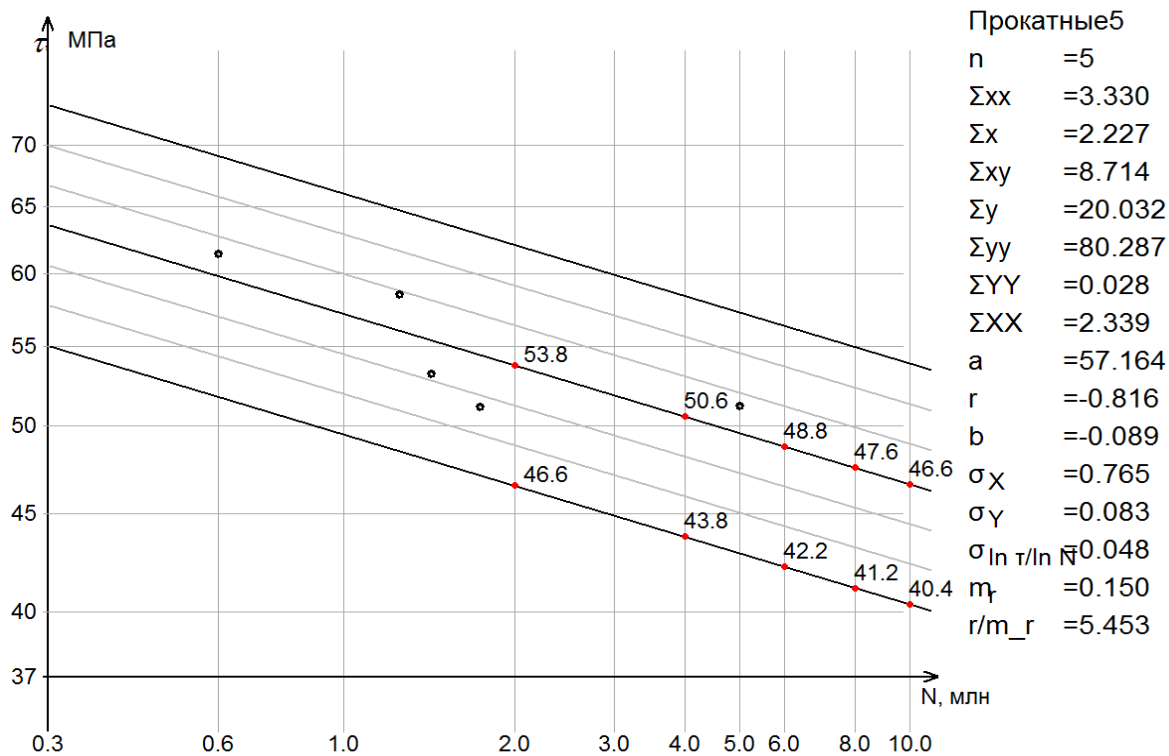


Рис. 4.9. Линия регрессий для симметричных колебаний в балках четвертой группы (по данным К.К. Нежданова, прокатные балки)

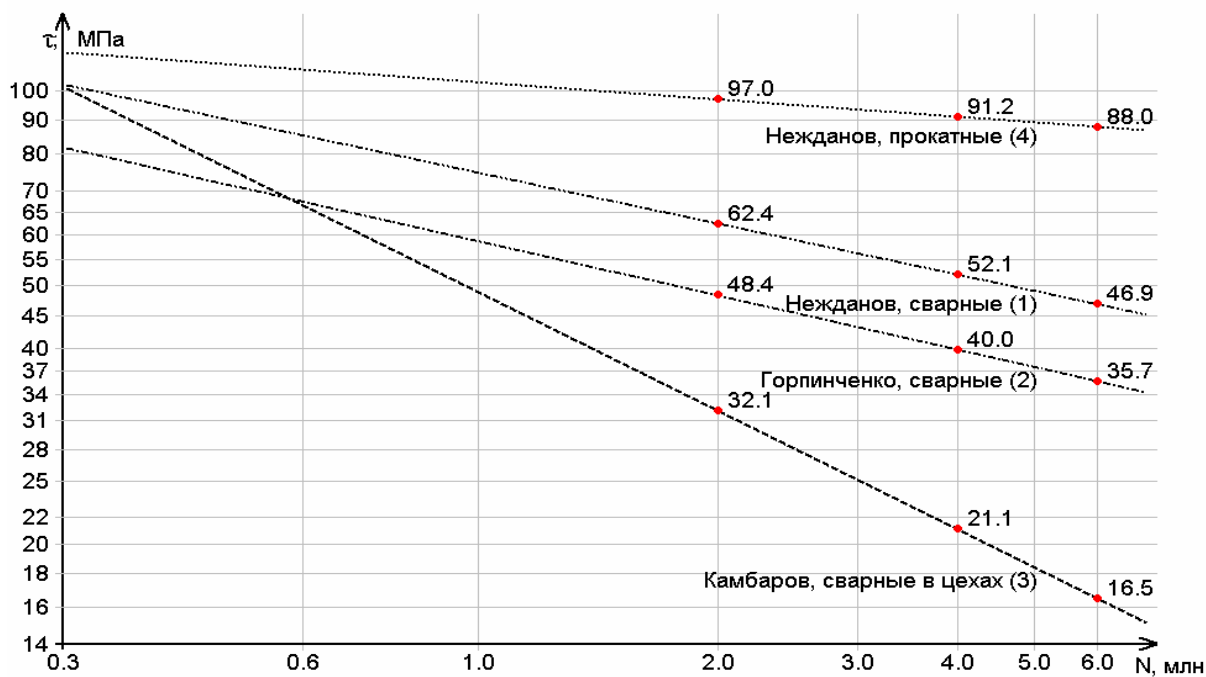


Рис. 4.10. Сравнение линий регрессий с учётом тройного рассеяния для отнулёвых колебаний

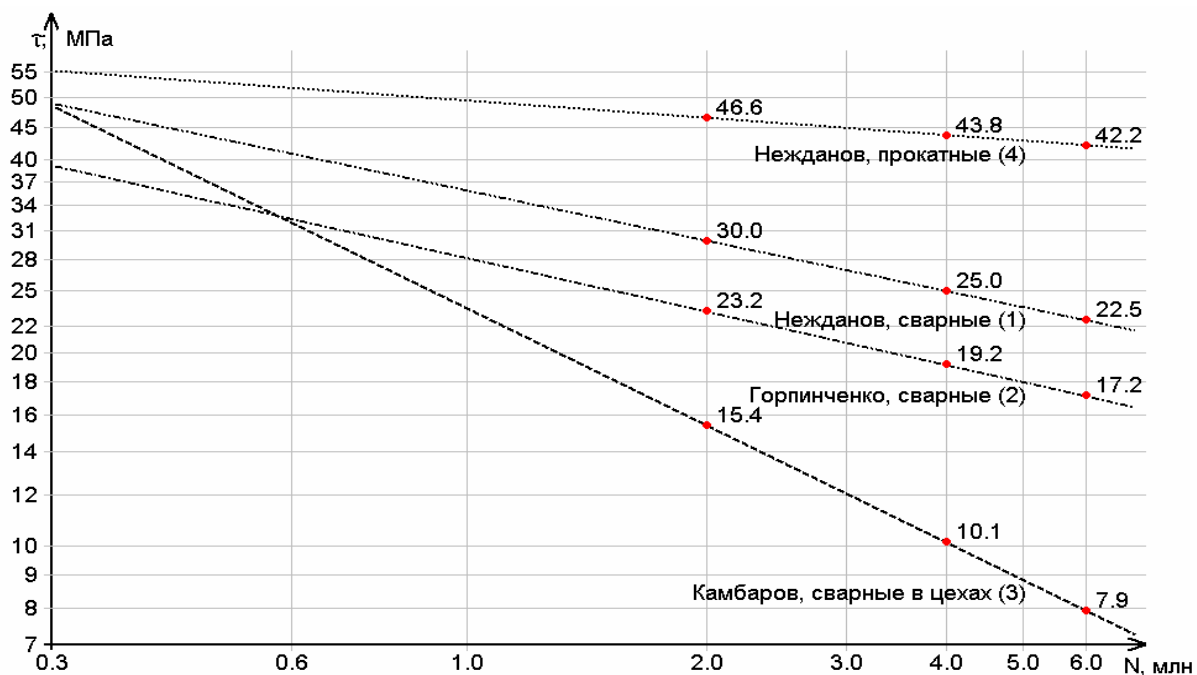


Рис. 4.11. Сравнение линий регрессий с учётом тройного рассеяния для симметричных колебаний циклов

Рассмотрим сварные балки. Как легко заметить, наибольшей выносливостью среди них обладают балки первой группы. Эта группа имеет *наилучшие показатели достоверности* при анализе – коэффициент корреляции наиболее высокий ( $-0,909$ ), его отношение к ошибке максимально (27,3, при принятом пороге в 4 единицы). Повышенная выносливость балок первой группы объясняется тем, что *качество швов более высокое*. Швы выполнены полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа.

Швы накладывались опытным сварщиком, причём выполнены с полным проваром, с плавными по радиусу переходами от шва к стенке и от шва к поясу балки. Кроме того следует отметить что применена малоуглеродистая сталь спокойной плавки В ст 3 Сп 5 (С 255), ГОСТ 27772-88 с минимальным количеством в ней вредных примесей и сварочная проволока толщиной 2мм Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70\*.

В зоне сварки поверхность соединяемых листов очищалась от верхнего прокатного слоя, что также повышало качество сварных швов.

Балки *второй* группы значительно *менее выносливы*, поскольку сварка выполнялась вручную. Такая сварка даёт больше микродефектов и повреждений в зоне сплавления шва со стенкой, также эти дефекты являются намного более серьёзными, чем возникающие при автоматической и полуавтоматической сварке. Корреляция значений в этой группе испытаний достаточно высока (0,887), но отношение коэффициента корреляции к ошибке ниже (10,2).

*Наихудшей* выносливостью обладают балки *третьей* группы – это балки, установленные в действующих цехах. Это можно объяснить тем,



что опытные балки всегда делаются более тщательно, в то время как в реальных цехах можно встретить непровары, подрезы, шлаковые включения, неровности, наплывы и прочие дефекты швов. Корреляция значений в данной группе наиболее низка (0,801), что указывает на большой разброс качества применяемых балок, достоверность результатов в этой группе, тем не менее, вполне достаточна ( $12,8 > 4$ ).

*Четвёртая* группа – балки, выполненные из **прокатных профилей**, показали **наивысшую выносливость** – до двух раз выше по сравнению с испытанием крупных моделей сварных балок с применением автоматической сварки и в **три...пять раз выше** по сравнению с балками, применяемыми в реальных цехах с кранами тяжёлого, интенсивного режима работы.

Полученные значения являются рассчитанными пределами выносливости для сварных и прокатных балок по результатам испытаний различных авторов. Гарантировать выносливость с вероятностью 99,86 % [50, 51] для заданного числа циклов можно только удерживая величину циклов колебаний сдвигающих напряжений меньше рассчитанного предела.

Таким образом, сравнение результатов испытаний подтверждает **высокую выносливость** балок с поясами из **прокатных тавров**. Используя рельс, как макрорегулятор (прил. 1) следует регулировать выносливость балок. Сварные балки из трёх листов не обеспечивают достаточную выносливость подрельсовой зоны даже с применением наиболее мощных из прокатываемых крановых рельсов ГОСТ 4121–62\* (КР-140), что также доказывает абсолютную необходимость замены сварных балок балками с прокатными таврами или уголками в подрельсовой зоне максимальных колебаний циклических локальных напряжений.

В балках с поясами из тавров сварной шов удалён вниз на значительное расстояние от зоны контакта рельса с поясом балки. Поэтому амплитуды колебания локальных напряжений в сварном шве значительно снижены, что *минимизирует* опасность возникновения в шве *усталостных трещин*.

Обработка экспериментальных результатов и построение графиков производилось с помощью специально разработанной программы. В данной программе расчёт производится следующим образом: сначала, в цикле, рассчитываются суммы  $\sum (\ln \tau_i)^2$ ,  $\sum \ln \tau_i$ ,  $\sum \ln N_i$ ,  $\sum (\ln N_i)^2$ , затем вычисляются средние значения  $\bar{N}$  и  $\bar{\tau}$ , затем, в цикле, рассчитываются суммы  $\sum X^2$ ,  $\sum XY$ ,  $\sum Y^2$  и, наконец, производится окончательный расчёт коэффициентов  $a_\tau$ ,  $b_\tau$ ,  $r$ ,  $m_\tau$ ,  $\sigma_{\ln \tau}$ ,  $\sigma_{\ln N}$ ,  $\sigma_{\ln \tau / \ln N}$ .

Таким образом, с достаточной достоверностью, получим для *первой* группы испытаний численные регрессионные зависимости пределов сдвигающих напряжений для симметричных:

$$\tau_{A=1K}^{\text{loc}} = a_\tau N^{b_\tau} = 46,583 \cdot N^{-0,260}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tau_{\text{пред.вын.}A=1K}^{\text{loc}} &= e^{\ln \tau_{A=1K}^{\text{loc}} - 3\sigma_{\ln \tau / \ln N}} = \\ &= e^{\ln 46,583 - 0,260 \cdot \ln N - 3 \cdot 0,0868} = e^{3,581 - 0,260 \ln N} \end{aligned} \quad (7)$$

и, аналогично, для отнулёвых циклов колебаний сдвигающих напряжений:

$$\tau_{A=0,5K}^{\text{loc}} = 97,022 \cdot N^{-0,260}, \quad (8)$$

$$\tau_{\text{пред. вын. } A=0,5K}^{\text{loc}} = e^{\ln 97,022 - 0,260 \cdot \ln N - 3 \cdot 0,0868} = e^{4,315 - 0,260 \ln N}. \quad (9)$$

Подставляя значение 6 миллионов циклов в формулы (7) и (9) (а также в аналогичные формулы для остальных групп исследований), получаем ожидаемые пределы выносливости для симметричных и отнулёвых циклов сдвигающих напряжений (табл. 4.6).

Т а б л и ц а 4 . 6

Пределы выносливости для различных групп испытаний при 6 млн циклов прокатываний колёс кранов, МПа

	Сварные балки			Прокатные Группа 1
	Группа 1	Группа 2	Группа 3, действующие цеха	
$\tau_{\text{пред.вын.}A=1K}^{\text{loc}}$	22,5	17,2	7,9	42,2
$\tau_{\text{пред.вын.}A=0,5K}^{\text{loc}}$	46,9	35,7	16,5	88,0

Основываясь на значениях экспериментальных результатов, для балок группы 1 построена диаграмма пределов выносливости по следующему алгоритму:

1. Проведём ось абсцисс, обозначим её как «средние сдвигающие напряжения цикла»  $\tau_m^{\text{loc}}$ .

2. Проведём ось ординат, обозначим её как «экстремумы циклов сдвигов»  $\tau_{\text{экстр}}^{\text{loc}}$ .

3. Проведём линию средних напряжений циклов колебаний – через начало координат, под углом  $45^\circ$ . Эта линия не может выйти за пределы расчётного сопротивления стали срезу, поэтому она оканчивается в точке  $\tau_m^{\text{loc}} = \tau_a^{\text{loc}} = -133,4$  МПа.

4. Отложим на вертикальной оси значения предела выносливости при симметричных циклах  $\tau_{\text{пред.вын.}A=1K}^{\text{loc}} = \pm 22,5$  МПа. Эти точки соответствуют максимально допустимой амплитуде при средних напряжениях, равных нулю (точки отложены на оси ординат, то есть  $\tau_m^{\text{loc}} = 0$ ).

5. Найдём значение амплитуды напряжений для  $\tau_{\text{пред. вын.}A=0,5K}^{\text{loc}} = 46,92$  МПа, согласно формуле (1):

$$\tau_a^{\text{loc}} = A_\tau \cdot \tau_{\text{экстр}}^{\text{loc}} = 0,5 \cdot 46,92 = 23,46 \text{ МПа}.$$

При отнулёвых колебаниях амплитуда равна средним напряжениям, то есть  $\tau_m^{loc} = \tau_a^{loc} = 23,46$  МПа.

6. По аналогии с диаграммой Смита, используемой в машиностроении, поскольку в подкрановых балках в подрельсовой зоне преобладают сжимающие напряжения, нанесём на диаграмму точку, соответствующую предельным напряжениям при отнулёвых циклах в третьей четверти декартовых координат, то есть (-23,46; -46,92 МПа).

7. Проведём нижнюю линию диаграммы от точки, соответствующей отрицательному значению предела выносливости при симметричных колебаниях, через точку, соответствующую отнулёвым колебаниям вплоть до расчётного сопротивления стали срез  $\tau_a^{loc} = -133,4$  МПа.

8. Нанесём на диаграмму точку, соответствующую положительному значению предела выносливости при отнулёвых колебаниях. Это величина  $\tau_a^{loc} = 0$  при среднем напряжении  $\tau_m^{loc} = -23,46$  МПа.

9. Построим верхнюю линию диаграммы от точки, соответствующей положительному значению предела выносливости при симметричных колебаниях, через точку, нанесённую на шаге 9 до предельного значения  $\tau_m^{loc}$ , достигнутого на шаге 8.

10. Поскольку экстремальные сдвигающие напряжения не могут превышать расчётного сопротивления стали срез, остаток диаграммы строится соединением концов отрезков, построенных на шагах 3 и 8, 3 и 10.

Диаграмма приведена на рис. 4.12. Аналогично построены диаграммы для балок остальных групп (рис. 4.13...4.15) [50, 51].

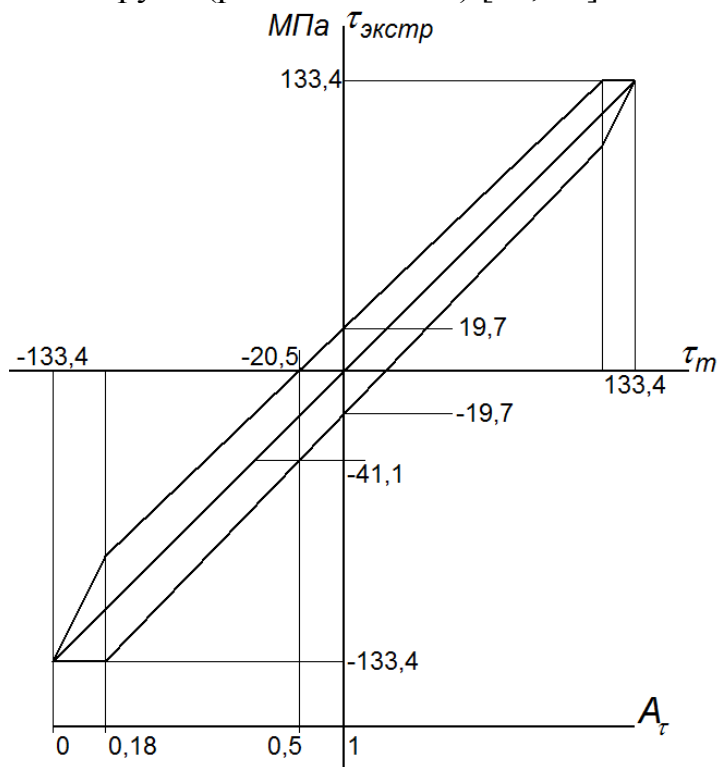


Рис. 4.12. Диаграмма пределов выносливости для *первой* группы сварных балок (10 млн циклов прокатываний колёс кранов)

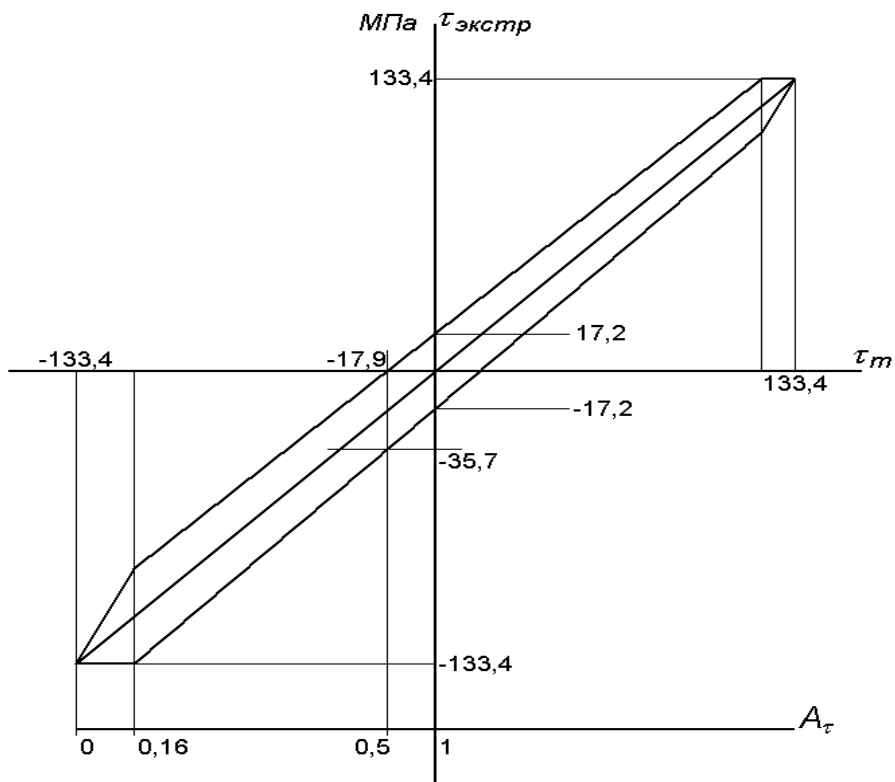


Рис. 4.13. Диаграмма пределов выносливости для *первой* группы балок (6 млн циклов прокатываний колёс кранов Горпинченко В.М.)

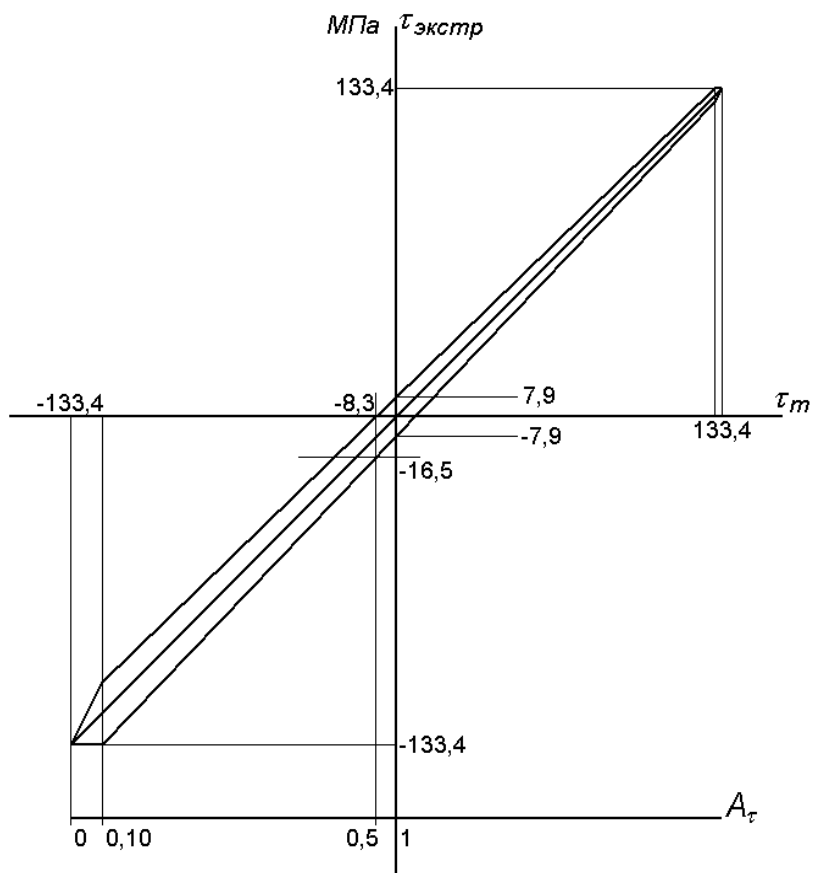


Рис. 4.14. Диаграмма пределов выносливости для *третьей* группы балок (6 млн циклов прокатываний колёс кранов В. Камбаров)

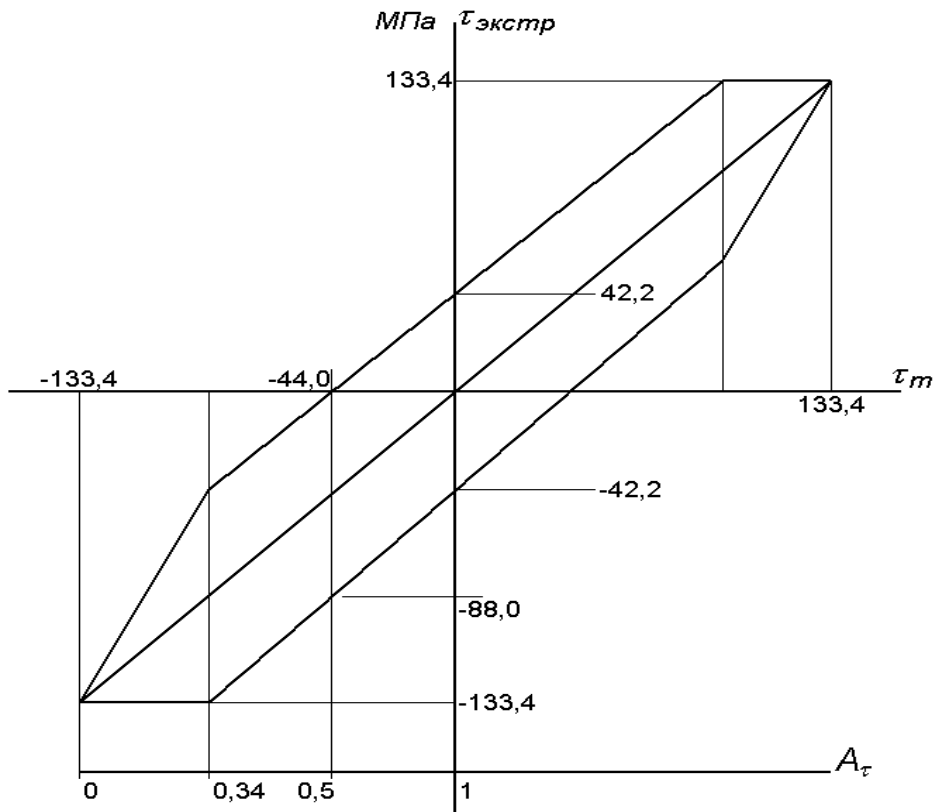


Рис. 4.15. Диаграмма пределов выносливости для *четвёртой* группы (6 млн балки прокатные)

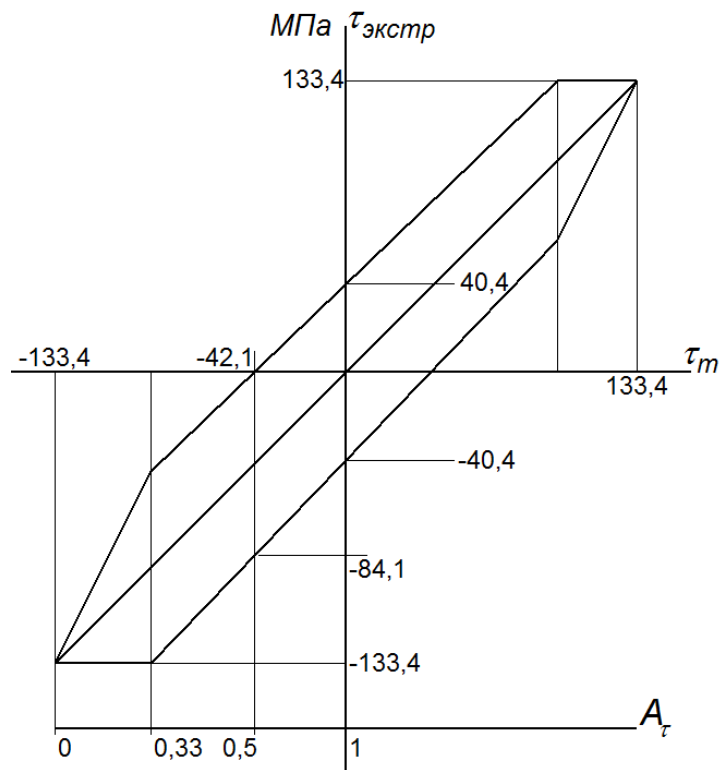


Рис. 4.15. Диаграмма пределов выносливости для *четвёртой* группы (10 млн прокатываний колёс кранов, балки прокатные) К.К. Нежданов

Для облегчения проверки выносливости запишем уравнение зависимости предельно допустимой амплитуды от величины среднего напряжения:

$$\tau_a^{loc} = a + b\tau_m^{loc} \quad (7)$$

при симметричном цикле колебаний напряжения  $\tau_m^{loc}$  равны нулю:

$$\begin{cases} \tau_{a A=1}^{loc} = a + b \cdot 0 \\ \tau_{a A=0,5}^{loc} = a + b\tau_{m A=0,5}^{loc} \\ \tau_{m A=0,5}^{loc} = \frac{\tau_{a A=0,5}^{loc}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

отсюда получим значения коэффициентов  $a$  и  $b$ :

$$\begin{cases} a = \tau_{a A=1}^{loc}; & b = 2 \frac{\tau_{a A=0,5}^{loc} - a}{\tau_{a A=0,5}^{loc}}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} a = \tau_{a A=1}^{loc}; & b = 2 \frac{\tau_{a A=0,5}^{loc} - \tau_{a A=1}^{loc}}{\tau_{a A=0,5}^{loc}}. \end{cases} \quad (10)$$

Для случая  $N=6$  млн циклов для балок первой группы получаем следующую зависимость:

$$\tau_{экстр}^{loc} = 22,5 + 2 \frac{46,9 - 22,5}{46,9} \tau_m^{loc} = 22,5 + 1,04 \tau_m^{loc}. \quad (11)$$

Формула (11) позволяет нам определить амплитудный коэффициент:

$$A_\tau = \frac{\tau_a^{loc}}{\tau_{экстр}^{loc}} = \frac{\tau_{экстр}^{loc} - \tau_m^{loc}}{\tau_{экстр}^{loc}}. \quad (12)$$

Таким образом, мы можем гарантировать выносливость К-образного сварного шва в подрельсовой зоне стенки балки при соблюдении следующих условий:

1) Амплитуды колебаний сдвигающих напряжений  $\pm \tau_a^{loc}$  не должны превышать предельной амплитуды колебаний  $\pm \tau_{a пред}^{loc}$  при заданном числе циклов прокатываний колёс мостовых кранов.

2) Экстремумы сдвигающих напряжений не должны превышать предела выносливости  $R_V$  при определённом амплитудном коэффициенте  $A_\tau$  и заданном числе циклов прокатывания колёс кранов.

### Пример использования диаграммы выносливости

Проверим выносливость двутавровой сварной балки (рис. 4.16) [52, 53], сечение которой состоит из поясов – верхнего  $61 \cdot 2 = 122 \text{ см}^2$ , нижнего  $41 \cdot 2 = 82 \text{ см}^2$  и стенки  $170 \cdot 1,2 = 204 \text{ см}^2$ , с суммарной площадью  $\sum A = 408 \text{ см}^2$ .

Высота сечения балки  $h=174 \text{ см}$ . Главный момент инерции  $J_x=1971148 \text{ см}^4$ . Статический момент верхнего пояса  $S_x = 9463,4 \text{ см}^3$ . Расстояние до центра тяжести от нижней грани равно  $y_{ц}=95,43 \text{ см}$ . Поперечная сила  $Q = 4375 \text{ гН}$ . Собственные моменты инерции верхнего пояса равны: при изгибе  $J_{\text{кру. п.}} = 40,7 \text{ см}^4$ , при кручении [107]

$$J_{\text{кру. п.}} = \frac{1}{3} \left( \frac{b}{t_{\text{п}}} - 0,63 \right) t_{\text{п}}^4 = \frac{1}{3} \left( \frac{61}{2} - 0,63 \right) \cdot 2^4 = 159,3 \text{ см}^4.$$

Характеристики крановых рельсов взяты из сортамента. Подвижные силы от колёс кранов грузоподъёмностью  $Q_{\text{кр}} = 16/20 \text{ т}$  с режимом работы  $8 K$  с **жёстким** подвесом груза приведены в табл. 1П1. Пролёт крана  $28,5 \text{ м}$ ; нормативные вертикальные силы от колёс кранов  $P_{\text{н}} = 4000 \text{ гН}$ ; масса крана  $195 \text{ т}$ ; масса тележки  $18,5 \text{ т}$ ; пролёт подкрановой балки  $12 \text{ м}$ ; тип крановых рельсов ГОСТ 4121–62\*.

Моменты инерции кручения крановых рельсов, рассчитанные Митюговым и включённые в ГОСТ 4121–62\* оказались завышенными. Используем уточнённые значения [100, 102]. Например, для наиболее массивного рельса КР-140 завышение в  $\approx 3$  раза.

Т а б л и ц а 4.7

Уточнённые моменты инерции кручения рельсов по ГОСТ 4121-62\*

Тип рельса	Площ. $A$ , $\text{см}^2$	$J_x^{\text{рел}}$ , $\text{см}^4$	$t_{\text{ш}}$ , $\text{см}$ .	$J_{\text{Кру}}^{\text{рел}}$ , $\text{см}^4$
КР 140	195,53	7427,23	5	1176,5
КР 120	150,44	4923,79	4,4	485,4
КР 100	113,32	2864,73	3,8	404,4
КР 80	81,13	1547,4	3,2	150,5
КР 70	67,3	1081,09	2,8	126,4

Кроме того в нормы «Нагрузки и воздействия» (актуализированная редакция) коэффициенты **динамичности** для тяжёлого режима работы мостовых кранов при определении локальных напряжений в подрельсовой зоне стенки **увеличены**  $\gamma_{\text{дин}} = \gamma_{f1} = 1,8$ , а горизонтальные воздействия, при торможении тележек кранов **увеличены в два** раза  $\leftrightarrow T_{loc} = 0,2P$  [5].

Средние напряжения от среза  $\tau_{xy}$  около опоры определяем по формуле Н.Г. Журавского при действии одного крана от нормативных сил  $P_H$ , умноженных на коэффициент повторяемости  $\gamma_{II} = 0,7$ .

$$\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_{X_{полл}}}{J_X \cdot t_{ст}} = \frac{4375 \cdot 9463,4}{1971148 \cdot 1,2} = 17,5 \text{ МПа}.$$

Эти напряжения малоизменчивы и создают фон, на котором происходят колебания циклических локальных сдвигов в подрельсовой зоне каждой из балок.

В подрельсовой зоне соединения верхнего пояса и стенки балки определим циклы колебаний локальных напряжений, возникающие при прокатывании каждого из катящихся колёс кранов  $P_{экр} = 4480$  гН.

В табл. 4.6 дан расчёт колебаний локальных напряжений в стенке балки [107]. Для сравнения приведены также аналогичные результаты расчёта для балки с верхним поясом коробчатого сечения (рис. 4.17).

$$P = \gamma_{над} \cdot \gamma_{дин} \cdot P_{нор} = 1,2 \cdot 1,2 \cdot 4000 = 5760 \text{ гН}$$

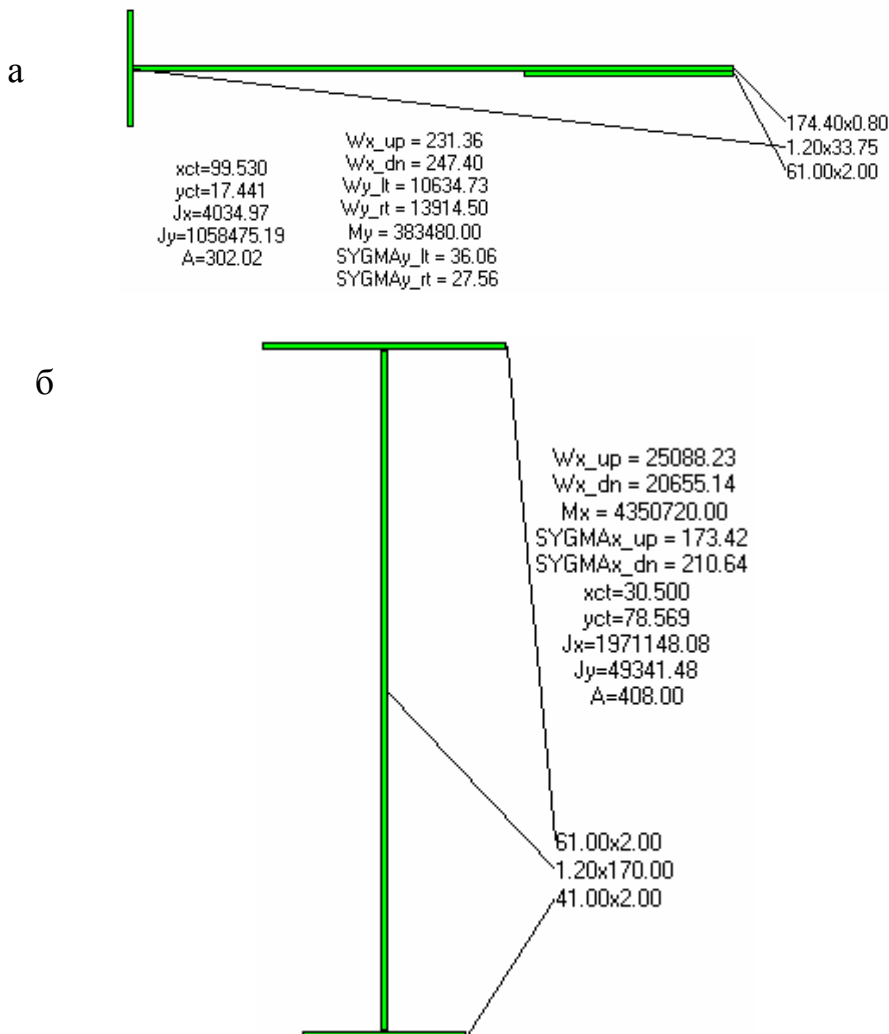


Рис.4.16. Сечение двутавровой подкрановой балки и тормозной балки для крана  $Q_{кр} = 16/20$  т (режим работы 8К захват груза жёсткий клещами)



Таблица 4.8

## Подвижные локальные силы от колёс кранов

Нормативные силы: вертикальная и горизонтальная, гН	Надёж- ности $\gamma_{\text{над}}$	Коэффициенты		Эквивалентная $P_{\text{экв}}^{\text{loc}} = \gamma_{\text{над}} \gamma_{\text{дин}} \gamma_{\text{пов}} P_{\text{нор}}$
		Динам. $\gamma_{\text{дин}} = \gamma_{f1}$	Повтор. $\gamma_{\text{пов}}$	
$\downarrow P_{\text{нор}} = 4000$	1,2	1,8	0,7	$P_{\text{экв}}^{\text{loc}} = 6048 \ 5040$
$\leftrightarrow T_{\text{нор}} = 0,2P_{\text{нор}} = 800$	1,2	1,8	0,7	$T_{\text{экв}}^{\text{loc}} = 1209,6 \ 1008$

Примечание: коэфф.  $\gamma_{\text{дин}}$  увеличен [6] до  $\gamma_{\text{дин}} = 1,8$ , а воздействия  $\leftrightarrow T$  при торможении тележек кранов увеличены в два раза  $\leftrightarrow T_{\text{экв}}^{\text{loc}} = 0,2P_{\text{экв}}^{\text{loc}}$  [6].

При определении сдвигающих напряжений  $\tau_{xy}$  около опоры (при расчёте сечения балки) также увеличены [6]  $\gamma_{\text{над}} = 1,2; \cdot \gamma_{\text{дин}} = 1,2$ .

Циклы колебаний локальных напряжений, в зоне К-образного шва, при многократном прокатывании колёс кранов

Воздействия колёс кранов:

$$\downarrow P_{\text{экв}}^{\text{loc}} = -6048 \text{ гН}, \leftrightarrow T_{\text{экв}}^{\text{loc}} = \pm 0,2P_{\text{экв}}^{\text{loc}} = \pm 1209,6 \text{ гН}.$$

Рельс КР-140 ГОСТ 4121–62\*:  $J_x^{\text{рел}} = 7427,2$ ,  $J_{\text{кру}}^{\text{рельс}} = 1176,5 \text{ см}^4$ , пояс  $J_x^{\text{пояс}} = 40,7 \text{ см}^4$ . Ошибка исправлена ( $J_{\text{кру}}^{\text{рельс}} = 2130 \text{ см}^4$ , ошибочное знач.)

Таблица 4.9

Прямоугольные рельсы равноценные по площади сечения и моменту инерции  $J_x$ , рельсам по ГОСТ 4121–62\*

Рельс	$h \times t$ , см	Площ. $A$ , см <sup>2</sup>	$J_x^{\text{рел}}$ , см <sup>4</sup>	$J_{\text{кру}}^{\text{рел}}$ , см <sup>4</sup>	Увел., раз
КР max	25,62 × 9,61	246,14	13463,31	4084,3	
КР Прям	21,35 × 9,16	195,53	7427,23	3293,91	2,8
КР Прям	19,82 × 7,59	150,44	4923,79	1585,66	3,267
КР Прям	17,42 × 6,51	113,32	2864,73	859,61	<b>3,92</b>
КР Прям	15,13 × 5,36	81,13	1547,4	400,71	2,66

Эффективная длина каждой из волн локальных напряжений

Циклы меняются при прокатывании каждого из колёс кранов. Рельс является макрорегулятором локальных напряжений в подрельсовой зоне стенки, так как увеличение рельса приводит к увеличению моментов инер-

ции рельса при изгибе  $J_x^{\text{Рел}}$  и  $J_{\text{кр}}^{\text{Рельс}}$  кручении, что благоприятно влияет на локальные напряжения в подрельсовой зоне [3, 4]

$$l_{\text{ef}} = 3,25 \times \sqrt[3]{\frac{\sum (J_x^{\text{рел}} + J_x^{\text{пояс}})}{t_{\text{ст}}}} = 3,25 \times \sqrt[3]{\frac{7427,2 + 40,7}{1,2}} = 59,8 \text{ см}.$$

Экстремум крутящего момента возникает со стороны эксцентриситета рельса ( $e_{\text{рел}} = 2 \text{ см}$ ). Крутящий момент увеличивает сжатие (-) в стенке со стороны эксцентриситета рельса ( $e_{\text{рел}} = 2 \text{ см}$ )  $P_{\text{экв}}^{\text{лос}} = 6048 \text{ гН}$   $T_{\text{экв}}^{\text{лос}} = 1209,6 \text{ гН}$   
 $M_{\text{кру}}^{\text{лос}} = -P_{\text{экв}}^{\text{лос}} \cdot e_{\text{рел}} - T_{\text{экв}}^{\text{лос}} \cdot h_{\text{рел}} = -6048 \cdot 2 - 1209,6 \cdot 19 = -35078,4 \text{ гН} \cdot \text{см}.$

### Колебания циклических локальных напряжений при качении колёс кранов

1. Минимум напряжений (кран отсутствует):  $\sigma_y^{\text{лос}} = 0, \tau_{\text{xy}}^{\text{лос}} = 0$ .

2. Если рельс установлен без эксцентриситета  $e = 0$  и горизонтальные тормозные силы отсутствуют  $\leftrightarrow T = 0, 2P = 0$ , то кручение рельса и верхнего пояса не возникает, сжимающие напряжения под колесом с одной и другой стороны стенки балки одинаковы (сжатие)

$$\sigma_y^{\text{лос}} = \frac{-P_{\text{экв}}^{\text{лос}}}{l_{\text{ef}} \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{-6048}{59,8 \cdot 1,2} = -84,28 \text{ МПа} \downarrow P_{\text{экв}}^{\text{лос}} = -6048 \text{ гН}$$

Экстремумы сжимающих и сдвигающих напряжений в стенке, возникают при прокатывании каждого из колёс кранов. Колебания напряжений  $\sigma_y^{\text{лос}}$  в стенке *отнулёвые* (от нуля до экстремума).

3. Если рельс установлен без эксцентриситета  $e = 0$  и горизонтальные тормозные силы присутствуют  $\leftrightarrow T_{\text{экв}}^{\text{лос}} = 0, 2P_{\text{экв}}^{\text{лос}} = 1008 \text{ гН}$ , то кручение рельса и верхнего пояса возникает  $M_{\text{кру}}^{\text{лос}} = -P_{\text{экв}}^{\text{лос}} \cdot e_{\text{рел}} - T_{\text{экв}}^{\text{лос}} \cdot h_{\text{рел}}$ , сжимающие напряжения под колесом с одной стороны стенки увеличиваются, а с другой стороны балки уменьшаются. Более опасны сжимающие напряжения.

4. Если рельс установлен с эксцентриситета  $e = 2 \text{ см}$  и горизонтальные тормозные силы присутствуют  $\leftrightarrow T = 0, 2P = 1008 \text{ гН}$  и действуют с эксцентриситетом равным высоте рельса  $h_{\text{рел}}$ , то возникший крутящий момент увеличивается  $M_{\text{кру}}^{\text{лос}} = -P_{\text{экв}}^{\text{лос}} \cdot e_{\text{рел}} - T_{\text{экв}}^{\text{лос}} \cdot h_{\text{рел}}$ . Кручение рельса и верхнего пояса, а сжимающие напряжения под колесом с одной стороны стенки увеличиваются, а с другой стороны стенки уменьшаются. Со стороны

эксцентриситета возникают максимальные сжимающие напряжения, которые действуют с *отнулёвыми* циклами и опасность их возрастает.

$$\sigma_{укр}^{\text{loc}} = \frac{-2M_{\text{кру}}^{\text{loc}} \cdot t_{\text{ст}}}{\sum J_{\text{кру}}^{\text{рельс}} + J_{\text{кру}}^{\text{пояс}}} = \frac{-2 \cdot 35078,4 \cdot 1,2}{1176,5 + 40,7} = -69,6 \text{ МПа}.$$

5. Сумма нормальных сжимающих локальных напряжений от нуля до  $\sum(\sigma_y^{\text{loc}} + \sigma_{укру}^{\text{loc}}) = -84,28 - 69,6 = |153,9| \gg 45 \text{ МПа}$  выносливость *не обеспечена*.

6. Амплитуды колебания циклов сдвигающих напряжений

$$\tau_{2\text{max}} = \sum 0,5 \cdot (\sigma_y^{\text{loc}} + \sigma_{укру}^{\text{loc}}) = -0,5 \cdot 153,9 = -76,9 \text{ МПа}$$

(амплитуда  $0,5 \cdot \tau_{2\text{max}} = |76,9| \gg 22,5 \text{ МПа}$ ) выносливость *не обеспечена*.

7. Амплитуды симметричных колебаний циклов сдвигающих напряжений  $\sum \tau_{аху}^{\text{loc}} = \pm(0,3 \cdot \sigma_y^{\text{loc}} + 0,25 \cdot \sigma_{укру}^{\text{loc}}) = |0,3 \cdot 84,28 + 0,25 \cdot 69,6| = 42,7 \gg 22,5$  выносливость *не обеспечена*.

Для определения характера циклов нагружений введём понятие амплитудного коэффициента сдвигающих напряжений:

$$A_{\tau} = \frac{\tau_a^{\text{loc}}}{\tau_{\text{экст}}^{\text{loc}}},$$

где  $\tau_a^{\text{loc}}$  – амплитуда колебаний сдвигающих напряжений;  $\tau_{\text{экст}}^{\text{loc}}$  – экстремум сдвигающих напряжений.

В соответствии с рассчитанной диаграммой выносливости делаем следующие проверки при рельсе КР-140 по ГОСТ 4121–62\*:

1. Циклы колебаний напряжений симметричные, амплитудный коэффициент  $A_{\tau} = 1$ . Предел выносливости  $\tau_{а\text{ предел}}^{\text{вын}} = 22,5 \text{ МПа}$ . Проверку произведём по результатам испытаний балок первой группы (сварка автоматическая с К-образной разделкой кромок, провар на всю толщину стенки балки):  $\tau_a^{\text{loc}} = 26,58 > \tau_{а\text{ предел}}^{\text{вын}} = 22,5 \text{ МПа} (R_v)$ . Амплитуда действующих напряжений превышает предельную амплитуду, следовательно, *выносливость не обеспечена*, усталостные трещины в данной балке возникнут раньше накопления 6 миллионов циклов прокатываний колёс кранов. Обратим внимание на то, что по результатам испытаний балок *второй и третьей* групп пределы выносливости значительно меньше, следовательно, *выносливость не обеспечена* тем более, усталостные трещины возникнут раньше.

2. Циклы колебаний напряжений *отнулёвые*, амплитудный коэффициент  $A_{\tau} = 0,5$ :  $\tau_{\text{экстр}}^{\text{loc}} < R_{\text{вын}}^{\text{loc}}$ ;  $\tau_{\text{экстр} A=0,5}^{\text{loc}} = 40,38 = 40,38 < R_{\text{вын}, A=0,5K}^{\text{loc}} = 46,93 \text{ МПа}$ .

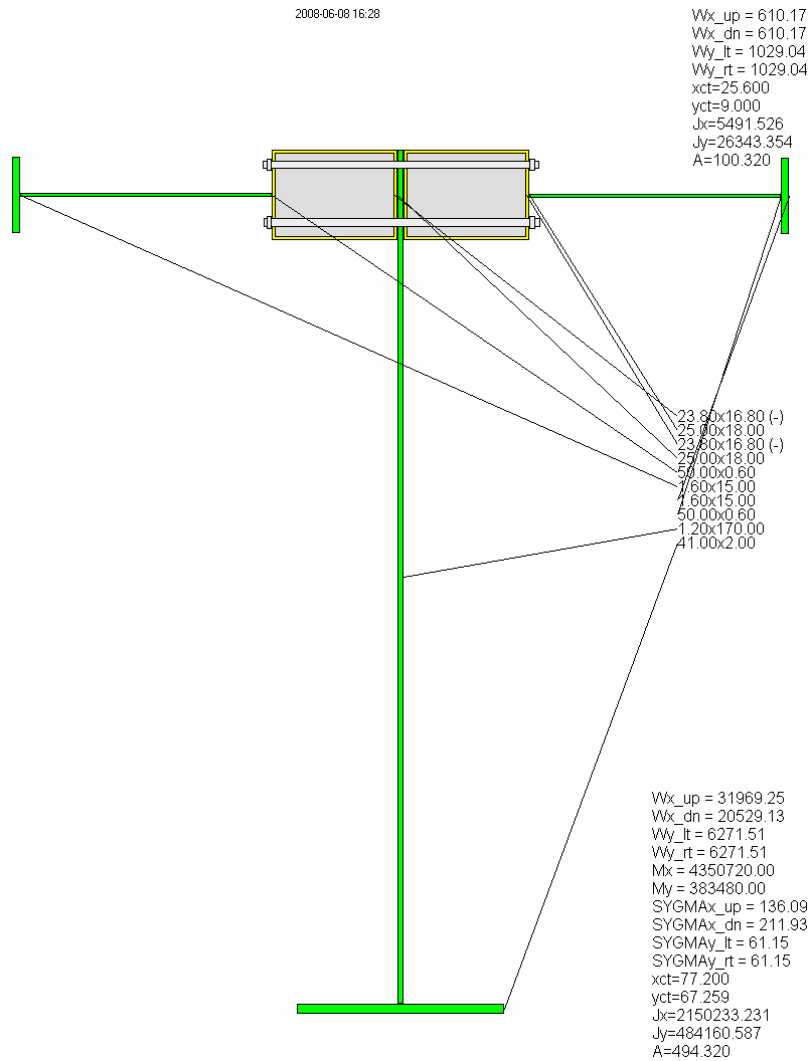


Рис. 4.17. Профиль балки с коробчатым верхним поясом, разделённым стенкой на два отсека (рёбра жёсткости не показаны)

$R_{\text{вын}, A=0,5K}^{\text{loc}} = 46,93 \text{ МПа}$  – предел выносливости,  $A=0,5$  обозначает отнулёвые колебания (от нуля до экстремума), индекс « $K$ » – «концентратор напряжений присутствует» (то есть присутствует сварной шов).

Экстремум действующих напряжений меньше предела выносливости, следовательно, выносливость по этому параметру обеспечена.

3. Проверим выносливость около опоры. В этом случае необходимо учитывать средние сдвигающие напряжения около опоры  $\tau_m = \tau_{xy} = 17,5 \text{ МПа}$ .

Предел выносливости около опоры

$$R_v = \tau_{\text{а предел}} + 1,04 \cdot \tau_m ;$$

$$R_v = 22,5 + 1,04 \cdot 17,5 = 40,7 \text{ МПа} .$$

Действующие напряжения около опоры балки:

$$\tau_{xy}^{\text{экс}} = \sum (\tau_{xy} + \tau_{\text{а } xy}^{\text{loc}}) = 17,5 + 23,31 = 40,81 \text{ МПа}.$$

$$\tau_{xy}^{\text{экс}} = 40,81 > R_v = 40,7 \text{ МПа.}$$

Экстремум сдвигающих напряжений больше предела выносливости, следовательно, *выносливость не обеспечена*.

Следует отметить, что самый массивный рельс *KP-140* в данном примере *не обеспечивает выносливость сварного соединения при 6 млн циклов прокатываний колёс мостовых кранов*. В реальных цехах зачастую используют и более слабые рельсы.

Произведя статистическую обработку экспериментальных результатов, взяв за независимый параметр напряжения, а за зависимый – число циклов до возникновения трещины (обработку здесь не приводим), можно получить линии регрессии для прогнозирования выносливости при данном уровне локальных колебаний напряжений. Так, для данной балки и рельса *KP-140* (ГОСТ–4121–62\*) мы можем дать следующие прогнозы: для балок первой группы – 3,7 млн; второй группы – 1,4 млн; третьей группы – 1,4 млн.

Стандартный выпускаемый рельс ГОСТ–4121–62\* (*KP-140*) самый массивный из прокатываемых в настоящее время рельсов, но выносливость *не обеспечивает!* Следовательно, выносливость нужно повышать другими способами, например, используя новый принцип конструирования сварных балок:

- ✓ Применяя прокатные профили: двутавровые, тавровые, из симметричных уголкового профиля с использованием высокоресурсных фрикционных соединений;

- ✓ Удаляя сварной шов на такое безопасное расстояние, где колебания локальных сдвигающих напряжений не могут привести к возникновению в шве опасной усталостной трещины.

Балка с верхним поясом из прокатного тавра является как раз таким случаем. Проверим выносливость прокатного тавра в зоне плавного перехода стенки в верхний пояс (балки *прокатные 4-й группы*) при рельсе *KP-100* (расчёт произведён по формулам из табл. 4.6):

$$\tau_{a A=1} = 28,24 < 42,2 \text{ МПа, } \tau_{a A=0,5} = 20,19 < 44,0 \text{ МПа,}$$

$$\tau_{\text{эксстр}} = 40,81 < R_v = 42,2 + 1,04 \tau_m = 60,4 \text{ МПа.}$$

Все три условия удовлетворены, *техническая ошибка при замене клёпанных подкрановых балок сварными балками*, допущенная в 30-х годах XX века *устранена*.

Выносливость при 6 млн циклов прокатываний колёс кранов для *сварной балки* при рельсе *KP-140* (ГОСТ–4121–62\*) *не обеспечена*.

Для балки с поясами из прокатных профилей тавров выносливость обеспечена. Для балки с коробчатым верхним поясом, разделённым стенкой на два отсека выносливость также обеспечена.

## Выводы

1. Полученные *пределы выносливости гарантируют достаточную работоспособность* при заданном числе циклов прокатывания колёс кранов (6 млн циклов прокатываний колёс кранов).

2. В ряде случаев *гарантировать выносливость в течение 6 миллионов циклов* при использовании существующих рельсов *невозможно* и её следует повышать другими способами, например, используя новый принцип конструирования сварных балок – удаляя сварной шов на такое расстояние, где локальные сдвигающие напряжения не смогут его повредить.

## 5. ТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ТИПЫ СЕЧЕНИЙ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК И РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ НАПРЯЖЁННЫМ СОСТОЯНИЕМ

### 5.1. Неблагоприятные последствия изменения конструктивной формы верхнего, наиболее нагруженного пояса подкрановых балок

Появление подкрановых балок связано с развитием промышленности в 1870...1875 годах. Сварки в то время не было, поэтому узловые соединения были клёпаными. По мере увеличения грузоподъёмности мостовых кранов и величины пролётов сечения балок быстро увеличивались.

Особенность подкрановых балок заключается в том, что они воспринимают подвижные сосредоточенные воздействия от колёс мостовых кранов. Причём от колёс передаются как сосредоточенные вертикальные силы  $\downarrow P^{loc}$ , так и сосредоточенные горизонтальные силы  $\leftrightarrow T^{loc}$ .

Подкрановая балка, в отличие от других конструкций, работает на косях изгиб, поэтому верхний пояс её выполняют более мощным, чем нижний.

В XX веке увеличение мощности верхнего пояса происходило как за счёт увеличения числа поясных листов, так и за счёт дополнительных вертикальных листов, подклёпываемых под поясные уголки.

На рис.5.1,*а* показана клёпаная двутавровая подкрановая балка под краны грузоподъёмностью  $Q = 200$  т с пролётом  $\ell = 10,67$  м. Высота сечения 1,85 м, толщина стенки  $t_{cm} = 18$  мм. Балка предназначена для типового мартеновского цеха [6, с.383, фиг.479] (запроектирована Ленинградским отделением ГИПРОМЕЗа). Конструкция клёпаного узла соединения верхнего пояса со стенкой балки показана ранее (см. рис.1.2) [3, с.12].

Тормозную балку для восприятия горизонтальных воздействий от мостовых кранов проектировали клёпаной односторонней и присоединяли её заклёпками горячей постановки к одному из более широких листов (см. рис.5.1,*б*) верхнего пояса [7, с.383, фиг.480].

Внешний пояс тормозной балки (или фермы) подкрепляли снизу наклонным подкосом и присоединяли подкос к нижнему поясу подкрановой балки [7, с.381, фиг.477].

На рис.5.1,*б* показана клёпаная тормозная балка для кранов грузоподъёмностью  $Q = 200$  т и шириной 1,85 м. Мощность и материалоемкость верхней части балки быстро нарастала.

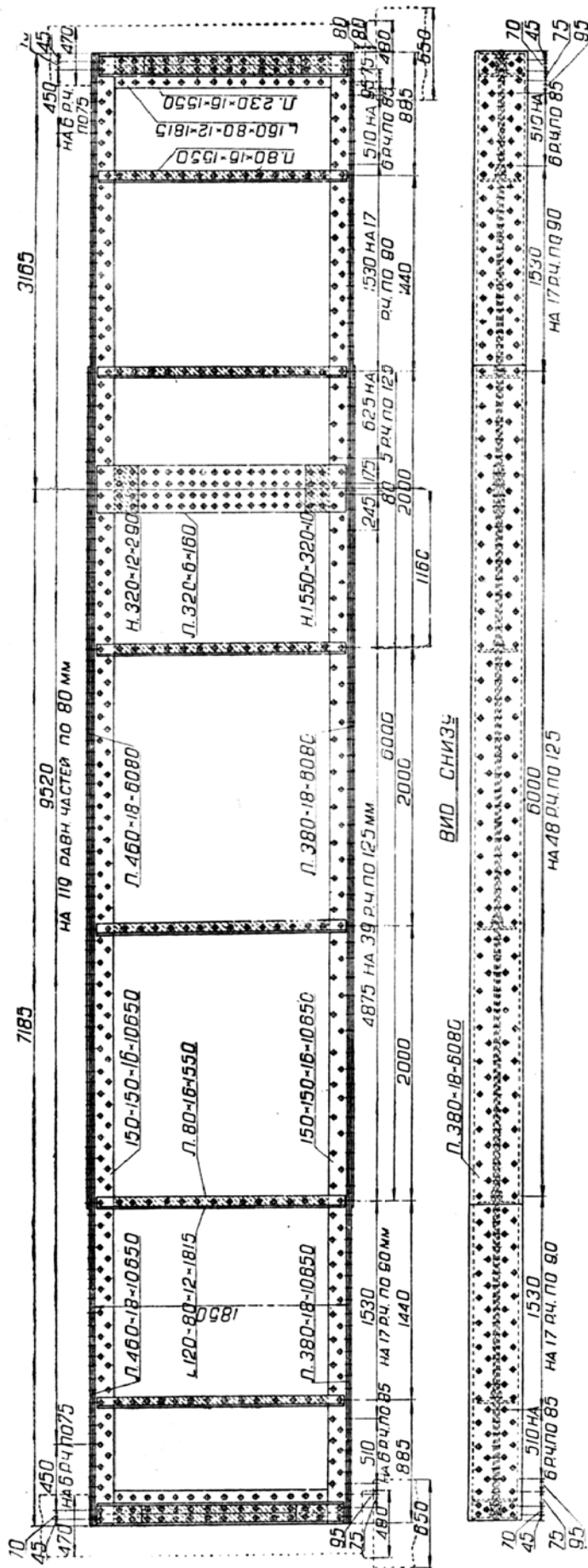


Рис. 5.1, а. Клёпаная подкрановая балка под краны грузоподъёмностью  $Q = 200$  т с пролётом  $l = 10,67$  м. Высота сечения 1,85 м, стенка  $t_{ст} = 18$  мм. Балка предназначена для типового маргеновского цеха



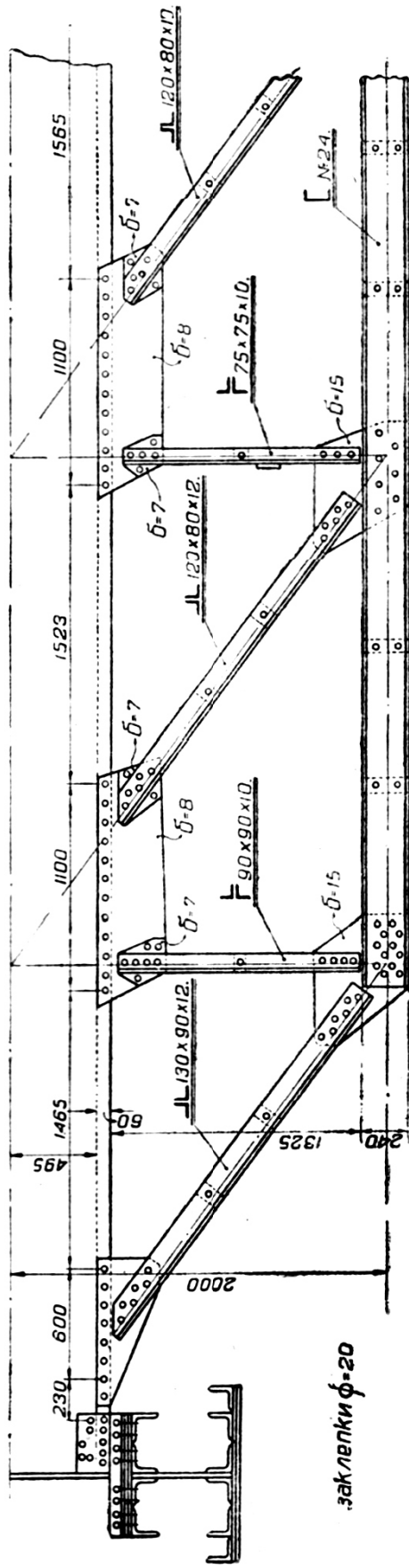


Рис. 5.1, б. Клёпаная балка под краны грузоподъёмностью  $Q = 200$  т с шириной сечения 2 м. Предназначена для восприятия горизонтальных  $\leftrightarrow T_{loc}$  воздействий от мостовых кранов

На рис.5.2,а показан температурный шов, а на рис.5.2,б – сечение этой же подкрановой балки.

Усталостных разрушений как в подкрановых так и в тормозных балках не наблюдалось.

Сварные соединения появились в конце XIX века. В начале XX века сварка плавящимся электродом постепенно стала вытеснять высокоресурсные клёпаные соединения. В 30-х годах XX века была допущена *техническая ошибка* – клёпаные соединения в подкрановых балках стали интенсивно вытеснять сварными соединениями со *значительно более низким эксплуатационным техническим ресурсом!*

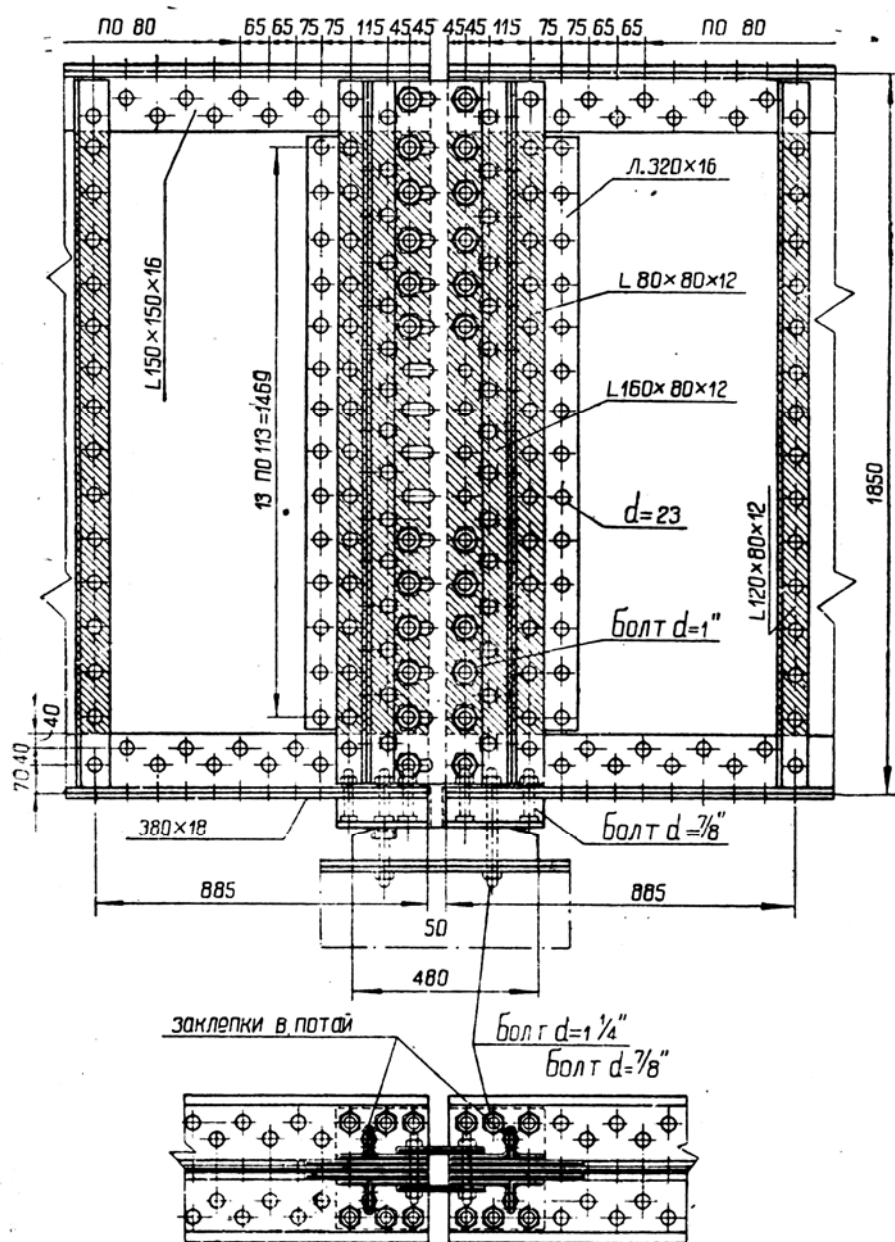


Рис. 5.2, а. Температурный шов в зоне стыка клёпаных подкрановых балок под краны грузоподъёмностью  $Q = 200$  т с пролётом  $l = 10,67$  м. Высота сечения 1850 мм, толщина стенки  $t_{ст} = 18$  мм

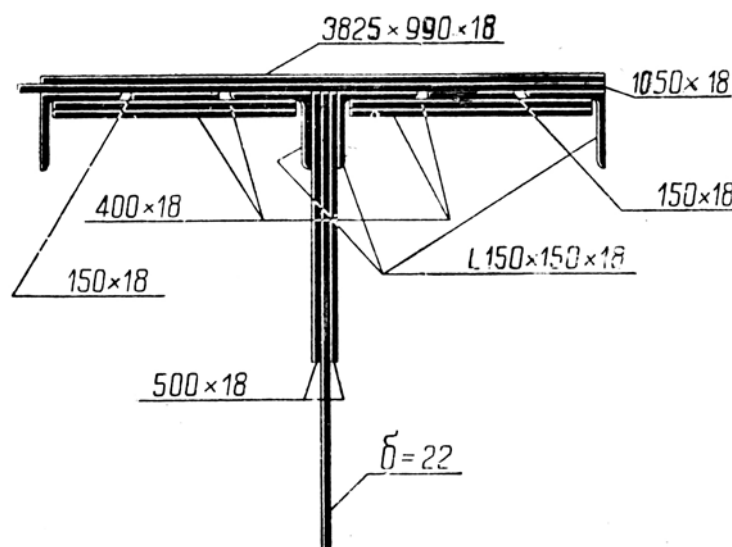


Рис. 5.2, б. Сечение клёпаной двутавровой подкрановой балки из прокатных профилей под краны грузоподъёмностью  $Q = 200$  т с пролётом  $l = 10,67$  м. Высота сечения 1850 мм, толщина стенки  $t_{ст} = 18$  мм

Клёпаные двутавровые балочные конструкции перекрытий заменили сварными из трёх листов – стенки и двух поясов. Стенку и пояса соединяли непрерывными сварными швами. Швы проверялись на действие сдвигающих напряжений по формуле Д.И. Журавского:

$$\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_{xp}}{J_x \cdot t_{ст}}$$

В балочных конструкциях перекрытий такая замена не вызвала негативных последствий.

К сожалению, клёпаные подкрановые балки с мощным верхним поясом (см. рис.1.2) были заменены по этому же принципу. Должного внимания *циклическим* локальным воздействиям от  $\downarrow P^{loc}$ ,  $\leftrightarrow T^{loc}$ ,  $M_{кр}^{loc}$  уделено не было и была *допущена серьёзная техническая ошибка* – локальные воздействия колёс кранов не были учтены! Это привело впоследствии к *серьёзной проблеме* – возникновению и развитию усталостных трещин в подрельсовой зоне подкрановых балок. Проблемы можно было бы избежать, если бы заклёпки были заменены *высокоресурсными болтами с гарантированной затяжкой*.

## 5.2. Особенности циклов локальных воздействий

$\downarrow P^{loc}$ ,  $\leftrightarrow T^{loc}$ ,  $M_{кр}^{loc}$ , возбуждаемых колёсами мостовых кранов

Локальные сосредоточенные вертикальные силы  $\downarrow P^{loc}$  переменны во времени. Они зависят от неизменной массы мостового крана и переменной величины поднимаемого груза. Масса тележки крана неизменна, однако величина вертикальных сил  $\downarrow P^{loc}$  от колёс крана изменяется в зависимости от её местонахождения. Колебания сил  $\downarrow P^{loc}$  происходят от  $\downarrow P_{max}^{loc}$  при нахождении тележки вблизи подкрановой балки до  $\downarrow P_{min}^{loc}$  при максимальном её удалении. У металлургических кранов масса крана может превышать массу поднимаемого груза в несколько раз, например [8, Т.2; 9].

В настоящее время ввиду низких темпов совершенствования мостовых кранов их колёса не подрессорены (рис. см.1.6). Поэтому динамические воздействия колёс на подкрановые балки достигают экстремальных величин. На стыках же рельсов и балок они возрастают в несколько раз. Особенно сильно динамика сказывается на стыках, не перекрытых накладками и с дефектами (см. рис.1.8, рис.1.9,б, рис.1.10). В этих случаях особенно часто возникают трещины в шейках рельсов и даже выкрашиваются отдельные фрагменты (см. рис.1.12) [7]. Такие повреждения обычно приводят к сходу колёс с рельсов и падению крана на подкрановую балку.

При сходе крана колесо падает с высоты рельса (15...19 см) и наносит сильнейший удар по верхнему поясу балки. На поясе появляется характерная вмятина. Особенно опасен такой сход крана с рельсов в случае наличия в балке усталостных трещин. В этом случае опасность схода крана с рельсов возрастает, так как может вызвать обрушение вместе с мостовым краном и подкрановой балки.

## 5.3. Влияние изгибных и крутильных характеристик рельсов на локальные напряжения в подрельсовой зоне стенки балки

Рельс в первую очередь воспринимает сосредоточенные *локальные воздействия*  $\downarrow P^{loc}$ ,  $\leftrightarrow T^{loc}$ ,  $M_{кр}^{loc}$  от катящихся колёс кранов. Возникают локальные крутящие моменты  $M_{кр}^{loc}$

$$M_{кр}^{loc} = P^{loc} \cdot e \pm T^{loc} \cdot h_{рел},$$

где  $e$  – эксцентриситет установки рельса относительно стенки балки (нормами ограничен [1, 2]  $e \leq 20$  мм), а  $h_p$  – высота рельса, так как горизонтальные силы  $\leftrightarrow \pm T^{loc}$  возникают за счёт упора гребней колёс в рельс [8, с.411]. Для тяжёлых режимов работы кранов  $\leftrightarrow \pm T^{loc} = 0,2 P^{loc}$  [6].

По исследованиям С.Д. Ницеты [56] горизонтальная сила  $\leftrightarrow \pm T^{loc}$ , может быть даже *больше*. Такая ситуация возникает при несоответствии расстояния между колёсами крана расстоянию между осями рельсов. Такой дефект приводит к расклинивающему или стягивающему воздействию гребней колёс на рельсы.

Рельсы выполняют функции макрорегуляторов. Они предназначены распределять сосредоточенные локальные силы  $\downarrow P^{loc}$ ,  $\leftrightarrow T^{loc}$ , и крутящий момент  $M_{кр}^{loc}$  распределяются на некоторый участок подкрановой балки. В СНиП [3, с. 47; 4–6] на основании исследований Б.М. Броуде внесены основные формулы для определения циклических колебаний локальных напряжений в подрельсовой зоне стенки балки.

Эффективная длина  $\ell_{ef}$  распределения локальных колебаний напряжений (для сварных балок) действующих циклами находится по формуле:

$$\ell_{ef} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{\sum J_x}{t_{ст}}},$$

где  $\sum J_x$  – сумма моментов инерции рельса и верхнего пояса балки при изгибе;

$$\sum J_x = J_x^{рел} + J_x^{в.п.}.$$

Из формулы видно, что  $\ell_{ef}$  в первую очередь зависит от момента инерции рельса при изгибе, так как моментов инерции рельса  $J_x^{рел}$  в десятки раз больше, чем  $J_x^{в.п.}$ . Поэтому рельс и является макрорегулятором напряжений в подрельсовой зоне.

На рис.3.5...3.8 показаны локальные сжимающие напряжения  $\sigma_y^{loc}$  и соответствующие им сдвигающие напряжения  $\tau_{xy}^{loc}$ . Сжимающие напряжения  $\sigma_y^{loc}$  достигают экстремума непосредственно под сосредоточенной силой  $\downarrow P^{loc}$ , приложенной в зоне контакта колеса крана с рельсом. Они быстро затухают по мере удаления точки  $M$  от начала координат  $O$ . Точка  $M$  удаляется от начала координат  $O$  по оси  $X$  и по оси  $Y$ .

Влияние напряжений  $\sigma_y^{loc}$  в точке  $M$  не зависит от того, будет ли колесо катиться по рельсу и удаляться от данной точки в стенке балки или мы будем смещать начало координат  $O$  на какую-то величину  $x_0$ .

Колебания локальных напряжений зависят от равномерности контакта рельса и верхнего пояса балки. На рис.3.5, 3.6 показаны плавные кривые, которые соответствуют равномерному контакту. Наличие шероховатостей в зоне контакта приводит к нарушению плавности кривой контактных

напряжений. В зоне неровностей нормальные и сдвигающие напряжения увеличиваются. Неровности сказываются тем сильнее, чем меньше момент инерции верхнего пояса при изгибе и кручении.

Эпюры циклических локальных колебаний напряжений легко сделать плавными, применив амортизирующую подкладку под рельсом одинаковой с ним длины. Работоспособность подкладки должна быть такой же, как самого рельса, поэтому её следует выполнять стальной, с гофрами (рис.5.3) [54].

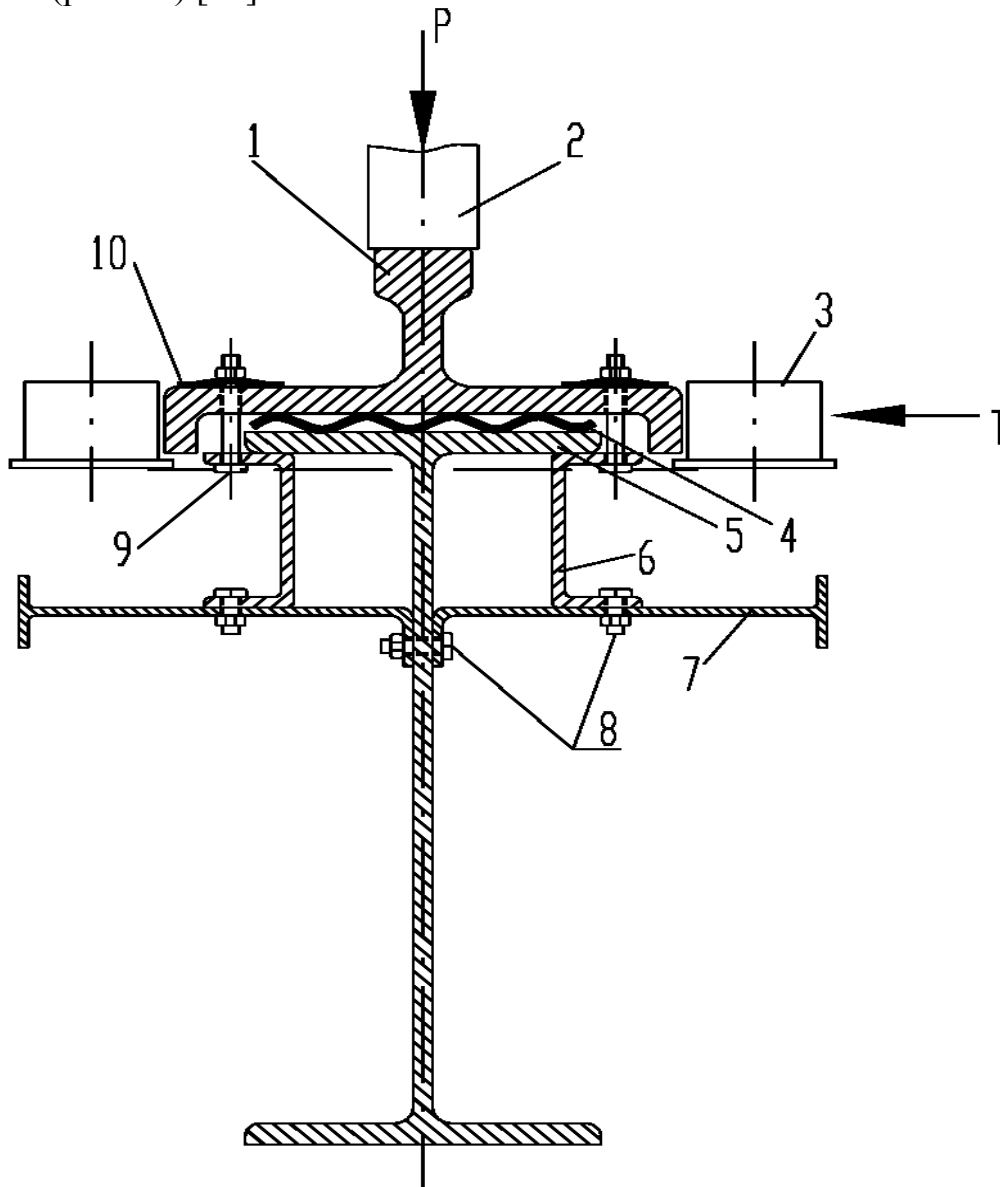


Рис. 5.3. Демпфирующая подрельсовая подкладка:  
 1 – трёхглавый рельс; 2 – основные безребордные колёса мостового крана;  
 3 – направляющие ролики крана; 4 – демпфирующая подрельсовая подкладка;  
 5 – верхний пояс; 6 – швеллеры; 7 – тормозная балка; 8 и 9 – высокоресурсные болты;  $P$  – вертикальные силы от основных безребордных колёс;  
 $T$  – горизонтальные силы от направляющих роликов крана

Очевидно, что работоспособность подрельсовой зоны будет тем выше, чем меньше уровень колебаний циклических локальных сдвигающих напряжений  $\tau_{xy}^{loc}$  и  $\tau_{2\max}^{loc}$ .

Все локальные напряжения связаны между собой зависимостями теории упругости. Рассматриваем случай только при соблюдении прямой пропорциональной зависимости между напряжениями и деформациями.

Для двенадцатиметровой сварной подкрановой балки для пятидесяти-тонного крана при рельсе КР80  $J_{x\text{ рел}}$  больше  $J_{x\text{ пояса}}$  в  $\approx 40$  раз, следовательно, рельс является **макрорегулятором** циклов колебаний локальных напряжений. Сдвигающие напряжения  $\tau_{xy}^{loc} = 0,3\sigma_y^{loc}$  определяются также по СНиП [3, 4].

Локальный крутящий момент  $M_{\text{кру}}^{loc} = P^{loc} \cdot e \pm T^{loc} \cdot h_{\text{рел}}$  также в сильной степени влияет на локальные сжимающие и сдвигающие напряжения. От  $M_{\text{кр}}^{loc}$  в стенке балки с одной стороны возникает локальное сжатие, а с другой стороны – локальное растяжение

$$\sigma_{y\text{ кр}} = \frac{\pm 2M_{\text{кру}}^{loc} \cdot t_{\text{ст}}}{\sum J_{\text{кру}}},$$

где  $\sum J_{\text{кру}} = J_{\text{кру.рел}} + J_{\text{кру.пояса}}$ ;

здесь  $J_{\text{кру.рел}}$  – момент инерции кручения рельса;  $J_{\text{кру.пояса}}$  – момент инерции кручения пояса.

Для двенадцатиметровой подкрановой балки для пятидесяти-тонного крана при рельсе КР 80  $J_{\text{кру.рел}}$  больше  $J_{\text{кру.пояса}}$  в  $\approx 2,5$  раза. И в этом случае рельс является **макрорегулятором**.

Крутящий момент  $M_{\text{кр}}^{loc}$  определяет, с какой стороны наиболее неблагоприятно напряжённое состояние. Усталостные трещины **всегда появляются со стороны эксцентриситета**, то есть с той стороны стенки, где возникает наибольшее сжатие. Появление усталостных трещин в подрельсовой зоне стенки схоже с явлением питтинга (выкрашивания), происходящего на дорожках подшипников. И в том и в другом случае усталостные трещины возникают от действия сдвигающих напряжений при локальном сжатии.

#### 5.4. Способы повышения выносливости подрельсовой зоны подкрановых балок

Выносливость подрельсовой зоны можно повышать несколькими способами.

До настоящего времени во многих справочниках рельс *ошибочно* предлагают назначать в зависимости от грузоподъёмности кранов [13, 47 105]. Рельс следует назначать в зависимости от циклических колебаний локальных сосредоточенных воздействий  $P^{loc}$ , а не грузоподъёмности! Действительно, если посмотреть таблицу характеристик мостовых кранов, то легко обнаружить *скачкообразные* изменения циклических колебаний локальных воздействий колёс кранов при увеличении их грузоподъёмности. Скачки-уменьшения  $P^{loc}$  происходят при *увеличении* числа колёс (с 4 до 8, до 16 и до 24).

В настоящее время двутавровые сварные балки выполняют из трёх листов: стенки и двух поясов. Для обеспечения провара стенки на всю её толщину производят К-образную разделку кромок. Предпочтение отдают автоматической сварке, так как качество её значительно выше, чем у ручной.

Но даже при К-образных поясных швах, проплавлении на всю толщину стенки и плавных по радиусу переходах от вогнутых швов к основному металлу эффективные коэффициенты концентрации напряжений, по данным М.М. Гохберга [9, Т.1, с.141], достигают **К=4**, то есть эффективный коэффициент концентрации напряжений есть отношение предела выносливости цельного металла, без сварных швов, к пределу выносливости соединения с концентраторами напряжений (при наличии сварных швов). Поэтому при **К=4 выносливость снижается в  $\approx 4$  раза** по сравнению с цельным металлом с прокатной коркой. Краностроители обоснованно не допускают такую высокую концентрацию, так как сварные швы при такой концентрации имеют очень **низкую выносливость**.

Анализ результатов усталостных испытаний [33–42, 46] позволяет сделать вывод, что выносливость подрельсовой зоны стенки с К-образного сварным поясным швом **не гарантирует минимальный срок службы подкрановой балки** с тяжёлым режимом работы мостовых кранов, ограниченный **десятью** годами при интенсивной эксплуатации.

Многочисленные обследования подкрановых конструкций в цехах чёрной и цветной металлургии подтверждают этот вывод.

Выносливость же подрельсовой зоны стенки балок **с поясами из тавровых профилей** при идентичных испытаниях на выносливость примерно в **1,9...2 раза выше**  $R_{v A=0,5}=79,7$  МПа.

Следовательно, конструирование сварных подкрановых балок должно происходить по новому принципу.



## 5.5. Новый принцип конструирования подкрановых балок

Принцип конструирования заключается в том, что К-образный сварной шов перемещаем из самой напряжённой подрельсовой зоны на такое безопасное расстояние, где колебания сдвигающих напряжений затухнут на достаточную величину. Поэтому колебания сдвигающих напряжений не превысят предел выносливости К-образного сварного шва. Новый принцип конструирования был запатентован в сварных двутавровых балках с поясами из тавровых профилей [43–45, 84, 86, 87] (см. рис.5.3...5.9).

В таких балках усталостные трещины в сварном шве появиться не могут, так как локальные напряжения снизились столь значительно, что их колебания не в состоянии повредить сварной шов усталостными трещинами.

Появление же усталостных трещин в зоне выкружки тавра предотвращается назначением рельса в зависимости от сосредоточенных воздействий колёс мостового крана  $P^{loc}$ . Расчёт подрельсовой зоны на выносливость показывает слабые зоны узла соединения верхнего пояса подкрановой балки со стенкой и подсказывает, каким образом следует поступить для *гарантирования* достаточной выносливости подрельсовой зоны.

Опорные рёбра жёсткости в таких балках не могут быть выполнены как у обычной сварной балки. Новый принцип применён и при конструировании опорных рёбер [61, 62]. Рёбра прикрепляются высокоресурсными шпильками или болтами с гарантированной затяжкой гаек гайковёртом либо заклёпками с внедряемым сердечником в каждую [61].

Амортизирующий узел соединения подкрановой балки с уступом колонны показан на рис.5.4, а на рис. 5.6 более крупно показан узел соединения трёхглавого рельса с верхним поясом подкрановой балки посредством высокоресурсных болтов с гарантированной затяжкой. Верхний пояс выполнен из прокатного тавра.

Подкрановая балка установлена на нижнюю 1 часть колонны без эксцентриситета, что позволяет снизить материалоёмкость рамы каркаса на **30...35 %**. Уступ 2 колонны выполнен из прокатного профиля. Рихтовку подкрановых балок в поперечном направлении выполняют с помощью рихтовщика 3 при ослабленном натяжении анкерных болтов 4, причём подкрановые балки зафиксированы на рихтовщике зубьями-фиксаторами 5.

Поперечную рихтовку смежных подкрановых балок выполняют регулировочными шпильками 6. Крепёжные 7 болты фиксируют балки в проектном положении на рихтовщике. Стенка 8 балки установлена с уклоном к вертикали, что также улучшает работу узла крепления.

Нижний пояс балки выполнен из полосовой стали, опорные 10 рёбра – выполнены из уголков, которые соединены со стенкой 8 высокоресурсными фрикционными шпильками с гарантированной затяжкой гаек.

Сварной шов удалён от циклических колебаний локальных воздействий  $P^{loc}$  и  $T^{loc}$  на достаточное расстояние, а  $M_{кру}^{loc}$  приближен к нулю. Тормозная 15 балка подпружинена пружинами 16 (верхние) и 17 (нижние), гасящими динамику воздействий колёс мостовых кранов.

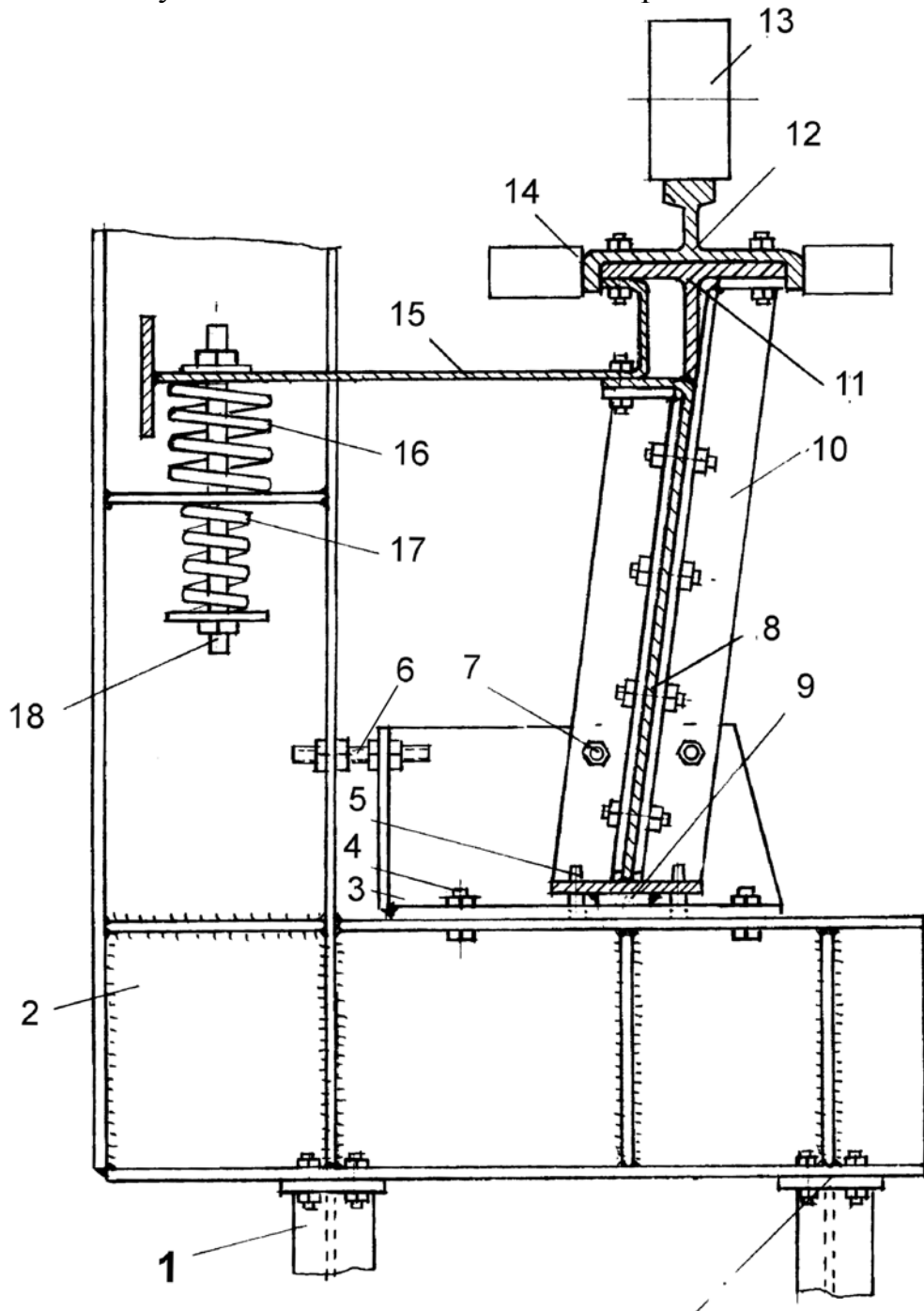


Рис.5.4. Амортизирующий узел соединения подкрановой балки с уступом колонны:

1 – нижняя часть колонны; 2 – уступ колонны; 3 – рихтовщик; 4 – анкерные болты; 5 – зубья-фиксаторы; 6 – регулировочные шпильки; 7 – крепёжные болты; 8 – стенка балки; 9 – нижний пояс из полосы; 10 – опорные рёбра из уголков; 11 – верхний пояс из тавра; 12 – трёхглавый рельс; 13 – безребордные колёса крана; 14 – направляющие ролики мостового крана; 15 – тормозная балка; 16 – верхние пружины; 17 – нижние пружины; 18 – регулировочная тяга

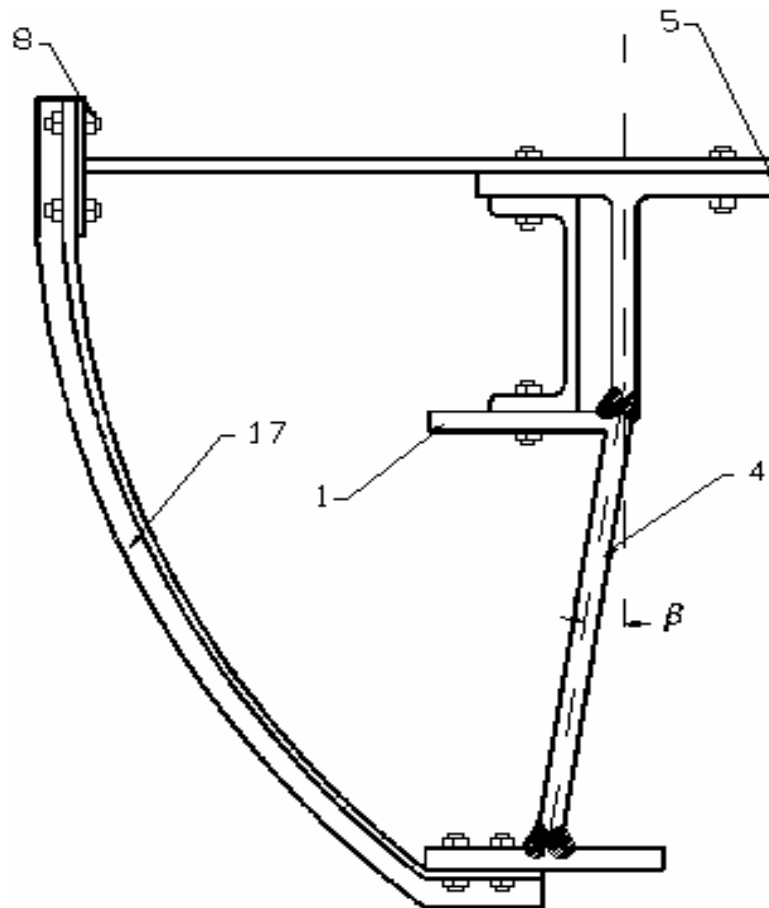


Рис. 5.5. Сечение подкрановой балки в пролёте

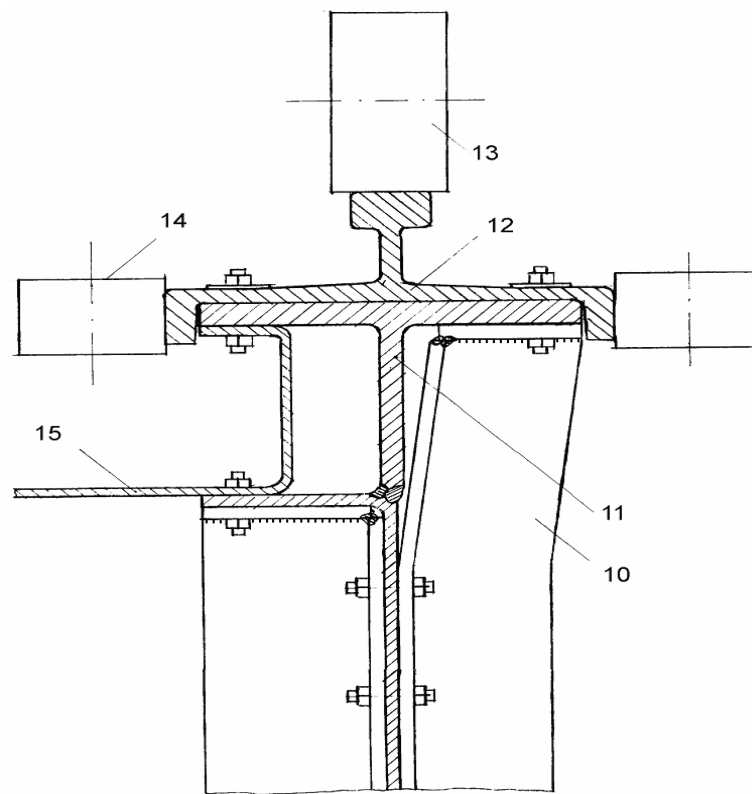


Рис. 5.6. Узел крепления рельса к верхнему поясу (см. рис. 5.4)

Концентраторы напряжений от сварки удалены вглубь на значительное расстояние от подвижных воздействий колёс кранов. Верхний 11 пояс выполнен из таврового прокатного профиля. Трёхглавый рельс 12 имеет высокие прочностные показатели, обеспечивающие ряд преимуществ. Колёса 13 у мостового крана безребордные, поэтому, направляющие ролики 14 крана передают горизонтальные воздействия  $T$  без эксцентриситета по отношению к верхнему поясу.

Долговечная конструкция подкрановой балки может быть собрана по новому принципу из листового проката и уголков, соединённых высокоресурсными шпильками. Верхним поясом у такой балки является подрельсовая подкладка, неподвижно соединённая с рельсом (рис. 5.7, а).

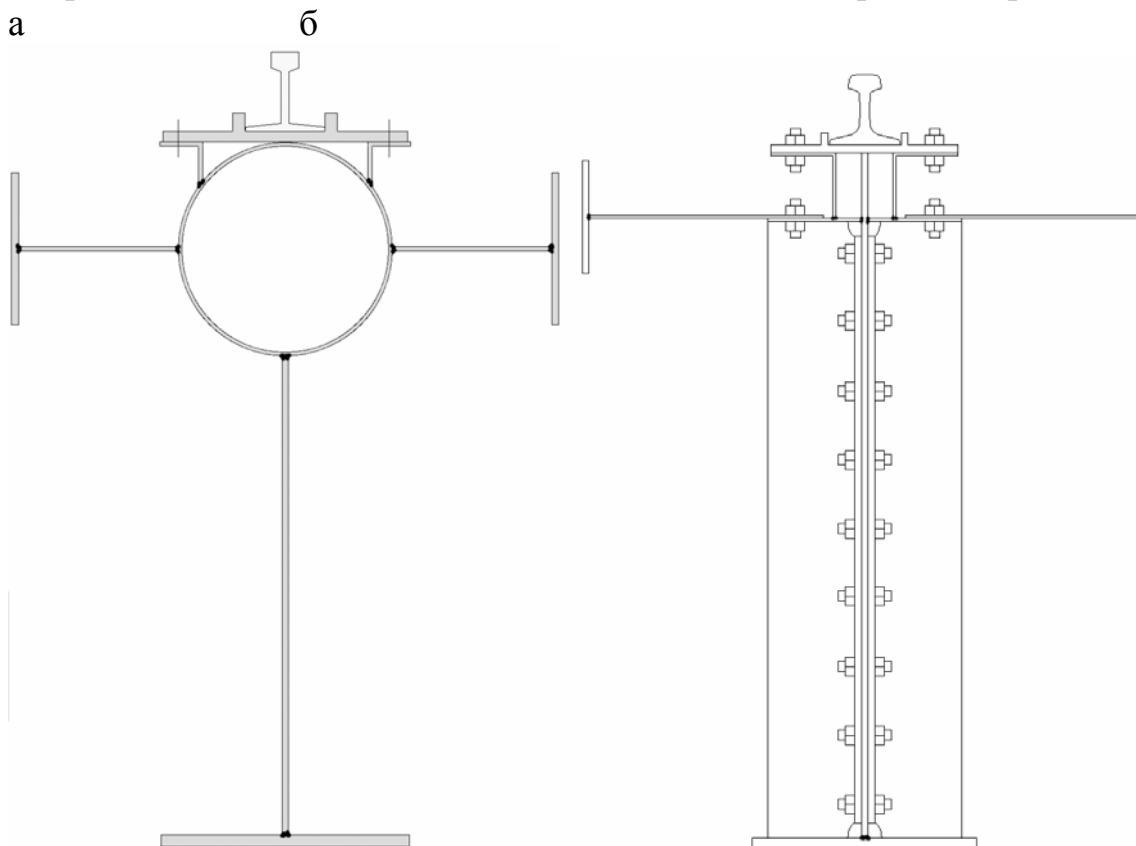


Рис. 5.7. Балки с новым принципом конструирования и выносливой подрельсовой зоной. Тормозная балка симметрична. Непрерывная подрельсовая подкладка плотно контактирует с подошвой рельса снизу, расширяет её и неподвижно соединена с подошвой:  
а – верхний пояс амортизирующий трубчатый; б – подрельсовая подкладка соединена с парой продольных рёбер парой швеллеров и образует верхний пояс из пары коробчатых элементов

Конструкция верхней части балки с трубчатым верхним поясом также может быть выполнена по этому принципу. В этом случае смонтированы обычные крановые рельсы (рис.5.7). Возможно неподвижное соединение рельса с подрельсовой подкладкой в заводских условиях на поточной линии.

Подрельсовая подкладка выполняет функцию верхнего пояса. Соединения высокоресурсные. Сварного шва в подрельсовой зоне нет. Тормозная балка симметрична.

Ещё одним вариантом снижения амплитуд колебаний локальных напряжений циклами является увеличение моментов инерции верхнего пояса балки на изгиб и кручение путём выполнения его трубчато-коробчатым. Например, в учебнике К.К. Муханова [64] подкрановая балка имеет верхний пояс  $61 \times 2$  см, с площадью сечения  $122 \text{ см}^2$ . Существует прокат замкнутых прямоугольных коробчатых профилей. Примерно с такой же площадью, как и верхний пояс балки, обладают два **коробчатых** профиля габаритами  $250 \times 180$  мм с толщиной стенки 6 мм. Заменяв верхний пояс парой таких профилей получаем балку с моментами инерции верхнего пояса на изгиб и кручение в *сотню* раз большими (см. рис.5.7).

Итак, в результате проделанной работы:

1. Выявлены технические ошибки конструирования при замене в 30 годах XX века клёпанных балок сварными балками. Технический ресурс и выносливость подрельсовой зоны балок были снижены в 3...4 раза, что привело к преждевременному появлению и развитию опасных усталостных трещин при циклических колебаниях локальных напряжений от сосредоточенных воздействий  $P^{loc}$ ,  $T^{loc}$  и моментов  $T^{loc} M_{кру}^{loc}$ .

2. Амплитудами циклов колебаний локальных напряжений возникающих от сосредоточенных воздействия  $P^{loc}$ ,  $T^{loc}$ ,  $M_{кру}^{loc}$  колёс мостовых кранов легко управлять, изменяя, в первую очередь, число колёс у крана, а не его грузоподъёмность. Например, литейный металлургический кран грузоподъёмностью 450 т воздействует на подкрановые пути сильнее, чем аналогичный кран грузоподъёмностью 500 т.

3. Рельс выполняет функции макрорегулятора локального напряжённого состояния в подрельсовой зоне и, применяя этот макрорегулятор, легко снизить локальные сдвигающие напряжения до такой величины, что они не будут повреждать подрельсовую зону стенки усталостными трещинами.

4. Новый принцип конструирования подкрановых балок заключается в перемещении К-образного поясного шва из подрельсовой зоны вниз на достаточное расстояние, что позволяет затухнуть колебаниям сдвигающих напряжений до величин, не способных вызвать появление усталостных трещин.

5. Получены новые конструкции подкрановых балок, обладающих высоким эксплуатационным техническим ресурсом, которые не подвержены

возникновению усталостных трещин за счёт выполнения профиля верхнего пояса замкнутым и увеличения тем самым его моментов инерции кручения и изгиба.

## 5.6. Новый принцип конструирования

В процессе работы над монографией был разработан новый принцип конструирования выносимых подкрановых балок. Принцип заключается в удалении К-образных швов из подрельсовой зоны балок на безопасное расстояние, где колебания сдвигающих напряжений затухают столь значительно, что не в состоянии вызвать возникновение и развитие трещин.

Продемонстрируем этот принцип для обычной двутавровой подкрановой балки с К-образным сварным швом (с проваром на всю глубину) в подрельсовой зоне. Преобразуем известную двутавровую сварную подкрановую балку следующим образом: вертикальные рёбра заменим симметричными двусторонними продольными рёбрами из листов, приваренных автоматической сваркой с V-образными швами с двух сторон к стенке балки. В продольных рёбрах заранее по шаблону просверлены отверстия с регулярным шагом.

Продольные рёбра и нижний пояс привариваются к стенке на автоматической поточной линии. На этой же поточной линии к рёбрам высокоресурсными болтами присоединяем два швеллера полками наружу.

В верхней горизонтальной полке каждого из швеллеров также заранее просверлены отверстия для соединения с верхним поясом балки высокоресурсными шпильками с гарантированной затяжкой, или заклёпками с внедряемыми сердечниками. После фрикционного соединения верхнего пояса со швеллерами образуется единое сечение высокоресурсной подкрановой балки, причём каждый из швеллеров, плотно контактирует и соединён с верхним поясом по всей длине и поддерживает его снизу.

Тормозную балку, с точки зрения упрощения монтажа, удобнее присоединить к продольным рёбрам, например, высокоресурсными шпильками с гарантированной затяжкой гаек гайковёртом или заклёпками с внедряемым в каждую сердечником. Как видим, в нашем случае повреждаемый усталостными трещинами К-образный поясной шов перенесён на 160...200 мм ниже по стенке. В результате этого эффективные коэффициенты концентрации напряжений **снижены с 4-х единиц до 1** [8, Т.1, с.141]. Произошло кардинальное повышение выносимости этой зоны. Наблюдается только плотный контакт верхней кромки стенки с верхним поясом снизу, металл цельный. В нашем случае V-образный шов опущен вниз на расстояние 160...200 мм от зоны контакта рельса.

Колебания локальных напряжений циклами в шве уменьшены пропорционально кубу этого расстояния – то есть они стали ниже предела выносливости сварного шва, **появление усталостных трещин в этой зоне стало невозможно.**

Возникли и другие положительные изменения. В верхней части подкрановой балки образовался замкнутый трубчатый контур, разделённый стенкой пополам рис. 5.7, а. Момент инерции верхней части балки на кручение повысился **в сотни раз**, и влияние внецентренно приложенных горизонтальных сил  $T^{loc}$  к головке рельса стало незначительным. Это также повысило выносливость. Новый тип сечения легко изготовить на модернизированной поточной линии.

### 5.7. Новые принципы конструирования выносливых подкрановых балок

Любое из известных сварных соединений значительно снижает выносливость узла, в котором используется автоматическая и тем более ручная сварка.

В машиностроении, при расчётах на выносливость используют эффективные коэффициенты концентрации напряжений [8, с.141]. В «Справочнике по кранам» [8, с.141, табл.1.5.1] (см. табл. 5.1) приведены эффективные коэффициенты концентрации напряжений  $K$  для типовых соединений металлических конструкций. Для основного металла с необработанной поверхностью эффективный коэффициент концентрации напряжений имеет **min** значение  $K = 1$ .

Для сдвигающих напряжений  $K_\tau = \tau / \tau_k$  и для нормальных напряжений  $K_\sigma = \sigma / \sigma_k$ , где  $\tau$  и  $\sigma$  – пределы выносливости гладкого образца, за который в металлических конструкциях принимается образец с сохранённой поверхностью проката без дополнительной концентрации напряжений, а  $\tau_k$  и  $\sigma_k$  – то же, для образца с концентрацией напряжений.

Следовательно, этот коэффициент  $K$  показывает, *во сколько раз снижается выносливость* при использовании того или иного соединения. Анализ табл. 5.1 показывает: чем **сильнее** любой концентратор напряжений, тем **ниже выносливость узла!**


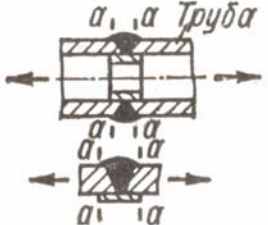
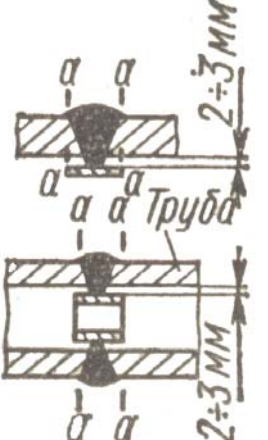


Таблица 5.1

Расчётные эффективные коэффициенты концентрации напряжений  $K$   
 типовых элементов крановых металлических конструкций [8, 9]

Характеристика расчётного сечения	Коэффициенты $K$ для стали		Схема соединения и расположения расчётного сечения $a-a$
	малоугле- родистой	низколе- гирован- ной	
1	2	3	4
1. Основной металл с необработанной прокатной поверхностью нормального качества с прокатными или обработанными механическим путём кромками в сечении вне сварных швов, болтов заклёпок и галтельных переходов	1,0	1,0	
2. То же, но с кромками, обрезанными газовой резкой: ручной машинной	1,4 1,2	1,8 1,3	
3. То же, но с обработанными механическим путём кромками при радиусе перехода: $R \geq 200$ мм для малоуглеродистой стали $R \geq 300$ мм для низколегированной стали $R = 10$ мм; $R = 1$ мм (прямой угол)	1,0 1,6 2,0	1,0 2,0 2,5	
4. Основной металл по сечениям соединений на чистых болтах с отверстиями из-под развёртки: при двухрезных болтах	1,4	1,6	
при однорезных болтах	1,6	1,8	
То же для заклёпочных соединений при отверстиях, образованных в пакетах сверлением на полный диаметр или развёрткой после прокола не менее 3 мм на диаметр:			
при двухрезных заклёпках	1,6	2,0	
при однорезных заклёпках	2,0	2,5	



Окончание табл. 5.1

1	2	3	4
5. Высокопрочные болты	1,0	1,0	
6. У стыкового шва с плотно прилегающей со стороны корня шва подкладкой, проваренной стыковым швом; шов перпендикулярен к действующему усилию	1,8 (2,2)	2,2 (2,8)	
То же, но при зазоре в 2...3 мм между стыкуемым элементом и подкладкой	2,0 (2,5)	2,5 (3,2)	
7. У поперечного (лобового) шва при передаче усилия через шов	2,5 (3,2)	3,2 (4,0)	
8. У непрерывных поясных швов балок с рельсом над стенкой при полном проваре стенки и вогнутых швах: при совпадении осей рельса и стенки и плотном прилегании подошвы рельса к поясу при допустимом смещении оси рельса с оси стенки на 15 мм и плотного прилегания подошвы рельса к поясу То же, но при неплотном прилегании подошвы рельса к поясу	2,0 3,2 4,0	3,2 4,0 см. прим. 6	

Анализ таблицы показывает, что *стыковые* сварные швы снижают выносливость соединения значительно *меньше*, чем нахлесточные и им следует отдавать предпочтение.

Так, для малоуглеродистой стали при соединении стыковыми швами экстремальное снижение выносливости – в 2,5...3,2 раза, а при соединении нахлесточными швами – **снижение выносливости достигает в 3,2...4 раза!** Соединение двухсрезными заклёпками горячей постановки приводит к снижению выносливости **в 1,6 раза.**

Соединения высокоресурсными шпильками или болтами с гарантированной затяжкой гаек обладают **наивысшей** выносливостью  $K=1$  [8, с.138] и являются **лучшими из известных!** Такой же высокой выносливостью обладают *заклёпки с внедряемыми сердечниками* [59, 70].

Сварные К-образные швы в подрельсовой зоне стенки в подкрановой балке из трёх листов, даже при полном проваре и выполнении их вогнутыми [8, с.141], **снижают выносливость в несколько раз:**

– при отсутствии эксцентриситета (при совпадении осей рельса и стенки) и плотном прилегании подошвы рельса к поясу – **в 2 раза;**

– при допустимом эксцентриситете при монтаже новой конструкции (смещение оси рельса относительно оси стенки не более чем на 15 мм) и плотном прилегании подошвы рельса к поясу – **в 3,2 раза;**

– то же, при неплотном прилегании подошвы рельса к поясу – **в 4 раза!**

**Снижение выносливости в 4...5 раз машиностроители не допускают!**

Таким образом, многочисленные экспериментальные результаты, систематизированные машиностроителями [8, с.138], свидетельствуют о том, что переход от пояса к стенке в подкрановой балке должен быть выполнен:

✓ либо цельным ( $K \approx 1$ ), (прокатные профили: двутавровый, уголки или тавр) сварной шов отсутствует, **наивысшая выносливость;**

✓ либо с использованием высокоресурсных фрикционных шпилек или болтов с гарантированной затяжкой гаек гайковёртом ( $K=1$ );

✓ либо с использованием заклёпок горячей клёпки ( $K=1,6$ ).

Усталостные трещины в подрельсовой зоне возникают в месте соединения стенки с поясом К-образными швами. Причиной их появления являются генерируемые колёсами кранов циклические локальные сдвиги в К-образном шве, а сдвиги генерируют локальные напряжения, перемещающиеся вдоль вместе с каждым колесом каждого крана [39–42].

Общепринято прочность изгибаемых элементов проверять в самых напряжённых зонах, то есть в балке на краях сечения. Такая проверка обеспечивает прочность и всего сечения. Нет смысла проверять выносливость К-образного шва по всей его длине. **Выносливость необходимо проверять в самых напряжённых зонах, где амплитуды сдвигов достигают экстремальных значений!**

Возмущение колебаний циклических локальных воздействий происходит на опорах разрезных подкрановых балок. В настоящее время СНиП [3, с. 47] не конкретизирует, каким образом следует конструировать опорную часть балки. В известных технических решениях [1–3, 10–12, 35] также не заостряется внимание на том, что высота опорных рёбер и высота балок в зоне опор должна быть строго одинакова.

При обследованиях зданий металлургического комплекса часто выявляется **несовпадение высот** опорных частей смежных подкрановых балок. В этом случае, по исследованиям А.Б. Патрикеева [15], **усталостные трещины всегда возникают в более высокой балке.**

Патрикеев А.Б. отмечает, что усталостные трещины в большинстве случаев начинаются от верхнего угла балки, где пересекаются три сварных шва: К-образный поясной шов и швы, прикрепляющие опорные рёбра, – вертикальный и горизонтальный.

Сварное соединение имеет недопустимо высокие эффективные коэффициенты концентрации напряжений  $K > 4$  [8, с.141], то есть **выносливость соединения опасно снижена более чем в четыре раза!** А вследствие образования ступеньки под рельсом колебания всех циклических локальных напряжений в этом угле дополнительно возрастают не менее чем **в два раза.**

В этой зоне балки неизбежно возникает усталостная трещина. Исследования А.Б. Патрикеева это подтверждают. Следовательно, узел опорного ребра сварных разрезных балок следует конструировать иначе.

При конструировании узла необходимо:

– часть опорных взаимодействий рельса с балкой передать, минуя балку, непосредственно на колонну, находящуюся под узлом;

– переместить К-образный поясной шов на безопасное расстояние, и этим обеспечить значительное снижение амплитуд колебаний сдвигов и уменьшить колебания сдвигающих напряжений ниже величины предела выносливости К-образного сварного шва [9, 52];

– устранить в узле опасные, недопустимо высокие концентраторы напряжений ( $K > 4$ ).

При выполнении перечисленных требований выносливость конструкций опасных узлов, повышается в несколько раз, при этом обеспечивается равная выносливость подрельсовой зоны и возникновение усталостных трещин в ней становится невозможным.

## 5.8. Рельсовые блоки

В третьем десятилетии XX века был произведён необоснованный переход от клёпаных к сварным балкам и *было потеряно* регулирующее влияние мощного верхнего клёпаного пояса. О циклических колебаниях локальных напряжений в тот момент не задумывались, в результате чего была допущена техническая ошибка.

Мы можем компенсировать данную техническую ошибку в конструкции опасного узла несколькими путями. Даже в том случае, когда К-образный сварной шов находится на минимальном расстоянии от циклических локальных воздействий колёс, можно обеспечить выносливость соеди-

нения, но придётся назначать слишком мощные рельсы, которые в настоящее время не прокатываются. Повышая моменты инерции рельсов при кручении  $J_{\text{кру}}$  и изгибе  $J_x$ , достигаем значительного снижения амплитуд колебаний локальных напряжений  $\sigma_y^{\text{loc}}$ ,  $\tau_{xy}^{\text{loc}}$ ,  $\tau_{\text{кру}}^{\text{loc}}$  и, следовательно, значительно повышаем выносливость и технический ресурс подрельсовой зоны стенки.

Заманчивая идея – увеличивать мощность рельса за счёт существующих прокатных профилей, поскольку освоение промышленностью новых **арочных** профилей задерживается.

**Необходима компенсация потерянной в 30-х годах XX века функции макрорегулятора** мощного верхнего пояса, состоящего из уголков и поясных листов, объединённых в единое целое заклёпочным соединением (см. рис. 1.1). Мы должны управлять напряжённым состоянием подрельсовой зоны и регулировать его в сторону снижения амплитуд колебаний локальных напряжений  $\sigma_y^{\text{loc}}$ ,  $\tau_{xy}^{\text{loc}}$ ,  $\tau_{\text{кру}}^{\text{loc}}$ .

Возникает вопрос использования существующих профилей рельсов в соответствии с новым принципом конструирования – то есть изготовление рельсов и рельсовых блоков с увеличенными моментами инерции  $J_{\text{кру}}$ ,  $J_x$ ,  $J_y$ ; и моментами сопротивления  $W_x$ ,  $W_y$ . Вероятны различные комбинации элементов, образующих *рельсовые блоки*.

На рис.5.8 показано соединение кранового рельса и пары рельсов от узкоколейки в единый трёхглавый рельсовый блок.

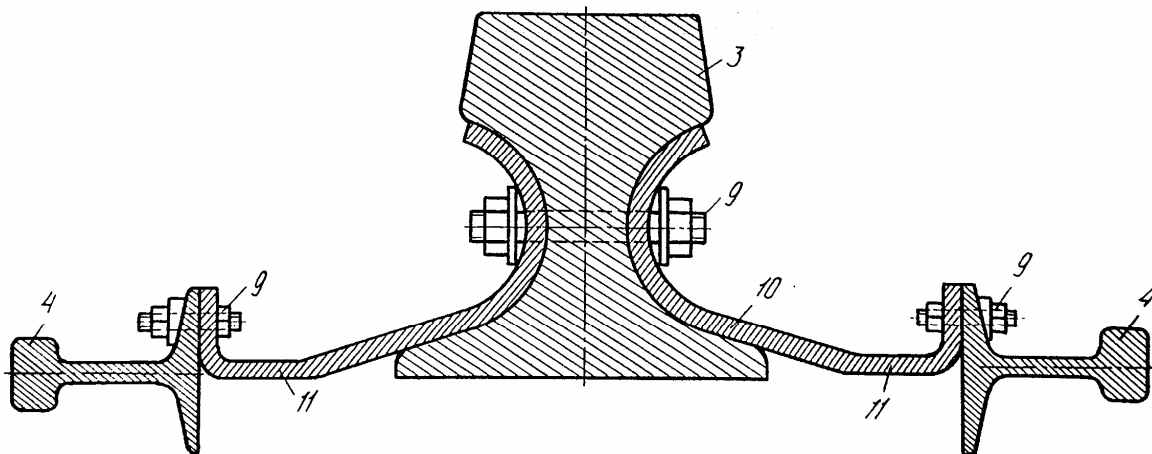


Рис. 5.8. Трёхглавый рельсовый блок, состоящий из элементов:  
1 – крановый рельс; 2 – рельс для узкой колеи; 3 – гнутый соединительный швеллер; 4 – высокоресурсные шпильки

На рис. 5.9 показано соединение рельса с подкрановой балкой посредством непрерывной подрельсовой подкладки, расширяющей подошву рельса.

Рельсовый блок состоит из нескольких элементов: 1 – стандартного рельса; 2 – непрерывной самонапрягающейся подрельсовой подкладки, которая имеет: 3 – гребни и 4 – боковые главы. Подрельсовая подкладка предназначена для неподвижного фрикционного соединения стандартного рельса с верхним поясом 5 подкрановой балки. Неподвижное соединение выполняют высокоресурсными шпильками 6 с гайками 7.

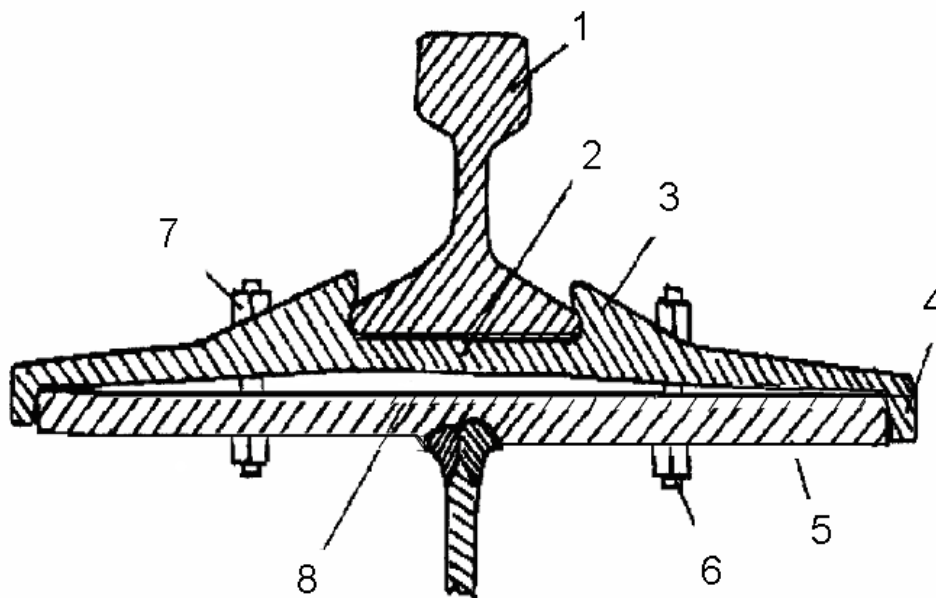


Рис. 5.9. Соединение рельса с подкрановой балкой посредством непрерывной подрельсовой подкладки, расширяющей подошву (напряжения нет):  
 1 – стандартный рельс; 2 – непрерывная подрельсовая подкладка; 3 – гребни подрельсовой подкладки; 4 – боковые главы подрельсовой подкладки;  
 5 – верхний пояс подкрановой балки; 6 – высокоресурсные шпильки с гайками 7

На рис. 5.10 рельс неподвижно соединён с подкрановой балкой и с подрельсовой подкладкой, расширяющей подошву, в единое целое посредством гарантированной затяжки гаек 7 на высокоресурсных шпильках до закрытия зазоров и плотного контакта элементов. Гребни 3 подрельсовой подкладки со значительным усилием зажимают подошву 2 рельса 1, и этим проскальзывание рельса по отношению к подрельсовой подкладки исключается. Рельс 1, подрельсовая подкладка 2 и верхний пояс 5 подкрановой балки работают как единое целое, слитно. Сдвиги в узле исключены.

На рис. 5.11 показан рельсовый блок, состоящий из пары железнодорожных рельсов неподвижно соединённых с широкополочным тавровым профилем. Широкополочный тавр, ориентирован стенкой вверх и соединён с парой железнодорожных рельсов. У пары железнодорожных рельсов 1 края подошв состроганы. Главы 2 рельсов плотно контактируют и охватывают стенку широкополочного тавра с двух сторон. При гарантированной затяжке гайковёртом высокоресурсных шпилек 3 рельсовый блок работает слитно как единое целое. В полке тавра *a* имеются отверстия для неподвижного соединения рельсового блока с подкрановой балкой.

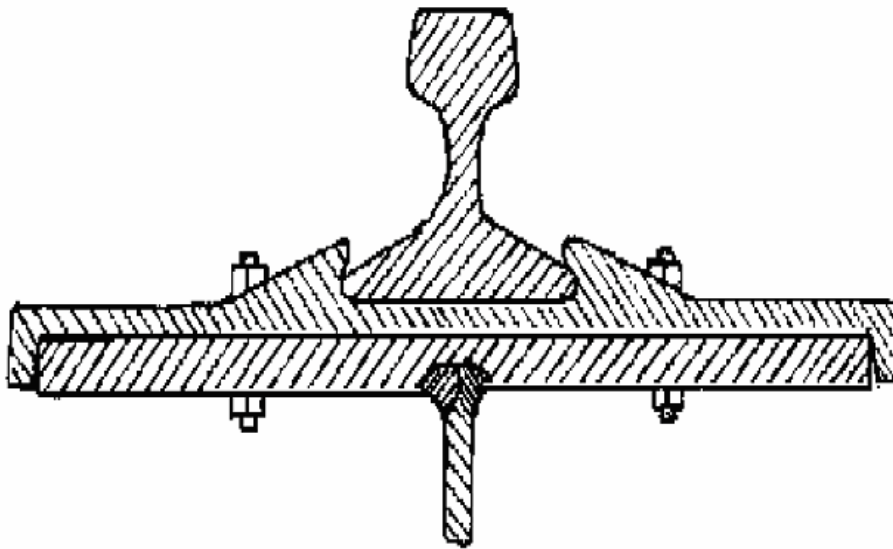


Рис.5.10. Рельс неподвижно соединён с подкрановой балкой посредством непрерывной подрельсовой подкладки, расширяющей подошву в единое целое (высокоресурсные болты напряжены, зазоры закрыты)

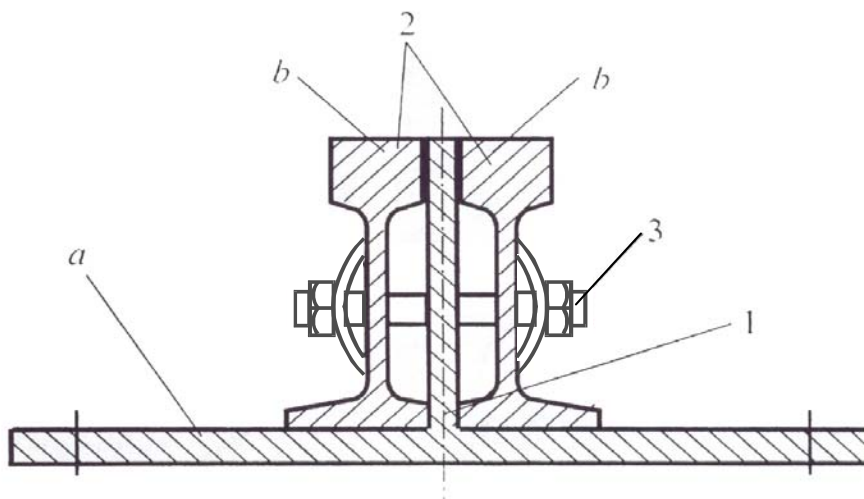


Рис.5.11. Рельсовый блок из широкополочного тавра, ориентированный стенкой вверх, и соединённый с ним пары железнодорожных рельсов:  
 1 – пара железнодорожных рельсов с удалёнными частями их подошв;  
 2 – главы рельсов; 3 – высококачественные шпильки с гарантированной затяжкой;  
 а – полка широкополочного тавра

На рис.5.12 показано соединение рельсового блока из широкополочного тавра, ориентированного стенкой вверх, и пары железнодорожных рельсов с высококачественной подкрановой балкой с замкнутой коробчатой формой в верхней подрельсовой её зоне. Рельсовый блок соединён с подкрановой балкой высококачественными шпильками 6. Стенка 1 широкополочного тавра и стенка 2 подкрановой балки соосны. Лист 5 тормозной балки выполнен гнутьём на листогибочном станке. Швеллерные 3 профили после затяжки высококачественных шпилек 6 образуют в подрельсовой зоне

замкнутый коробчатый контур, отлично воспринимающий крутящие воздействия. Внешний пояс  $c$  тормозной балки может быть выполнен как из листа 5, так и из тавра.

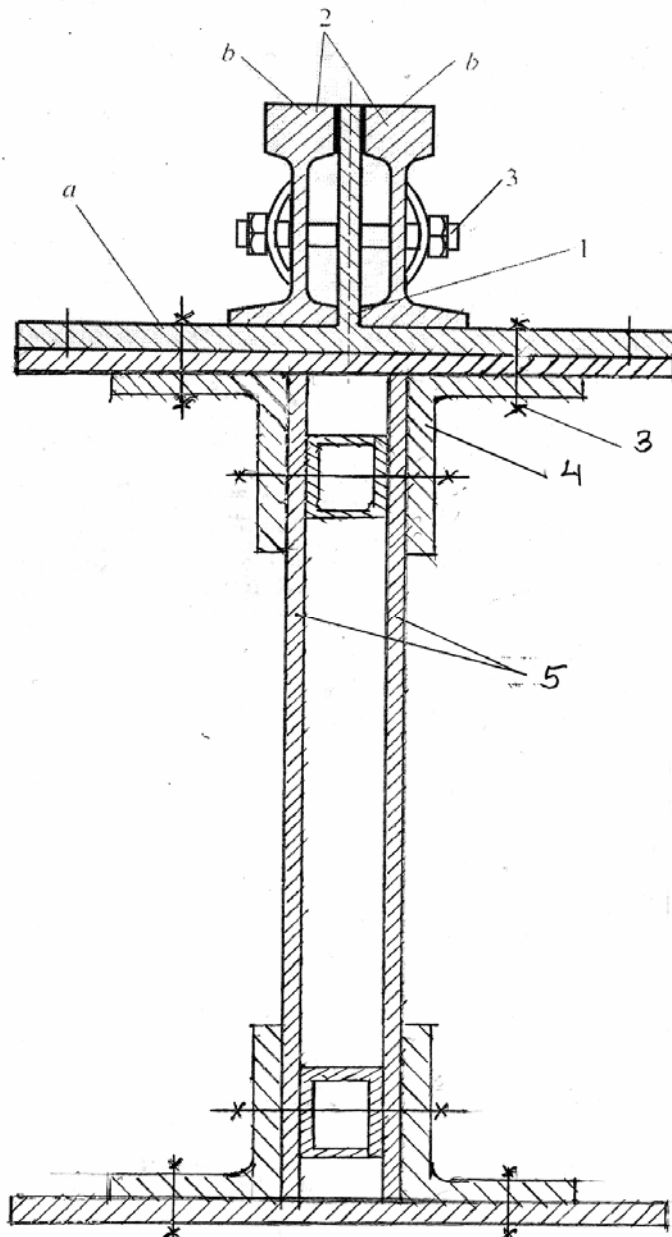


Рис.5.12. Соединение рельсового блока из широкополочного тавра, ориентированного стенкой вверх, и пары железнодорожных рельсов с высокоресурсной подкрановой балкой с замкнутым коробчатым контуром в верхней подрельсовой её части:

- 1 ( $a$ ) – стенка широкополочного тавра пары стандартных рельсов;  $b$  – главы рельсов; 2 – стенка подкрановой балки; 3 – швеллер; 4 – уголок; 5 – лист тормозной балки; 6 – высокоресурсные шпильки;  $c$  – внешний пояс тормозной балки

На рис.5.13 показан рельскоколёсный анкерный механизм с автоматическим напряжением клемм. Такой способ закрепления рельсов рельсовыми клемма и напряжения их может быть использован как на железнодорожных магистралях, так и для подкрановых конструкций.

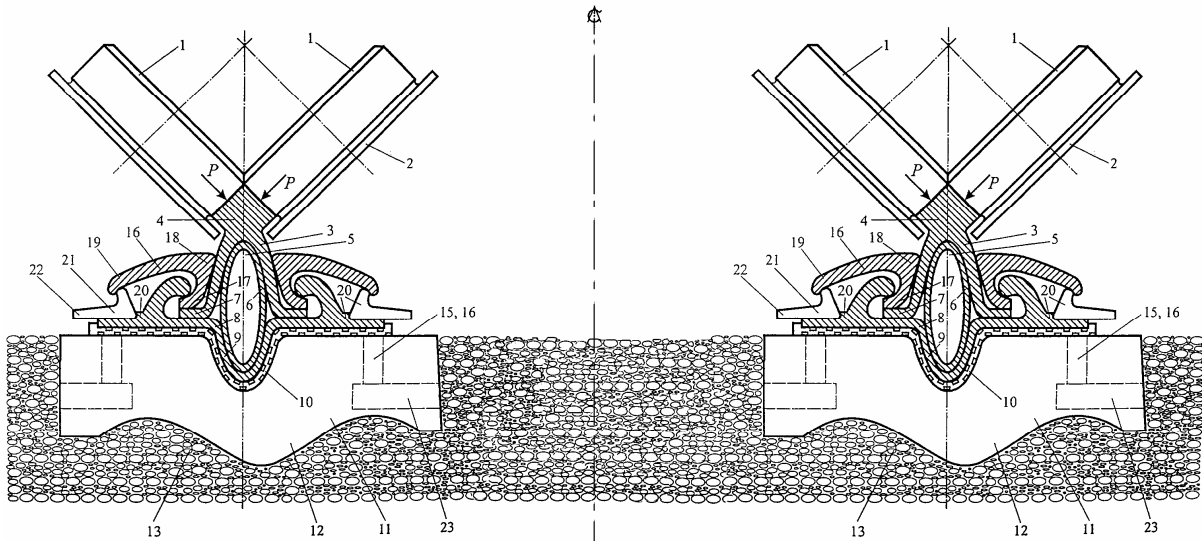


Рис.5.13. Автоматически натягаемый рельсоколёсный анкерный механизм в разрезе:

- 1 – колёса транспортного средства; 2 – гребни безопасности; 3 – арочный рельс;
- 4 – четырёхгранная глава; 5 – полость; 6 – овальный амортизатор;
- 7 – опорные пяты рельса; 8 – подрельсовая подкладка; 9 – продольный гофр подрельсовой подкладки; 10 – электрическая прокладка; 11 – шпала, на которую опирается рельсовый блок или подкрановая балка; 12 – гофр; 13 – балласт; 14,15; 16 – крепёжные элементы; 17 – клемма; 18 – крюк её; 19 – консольный участок её; 20 – упор; 21 – эксцентрик; 22 – ручка эксцентрика

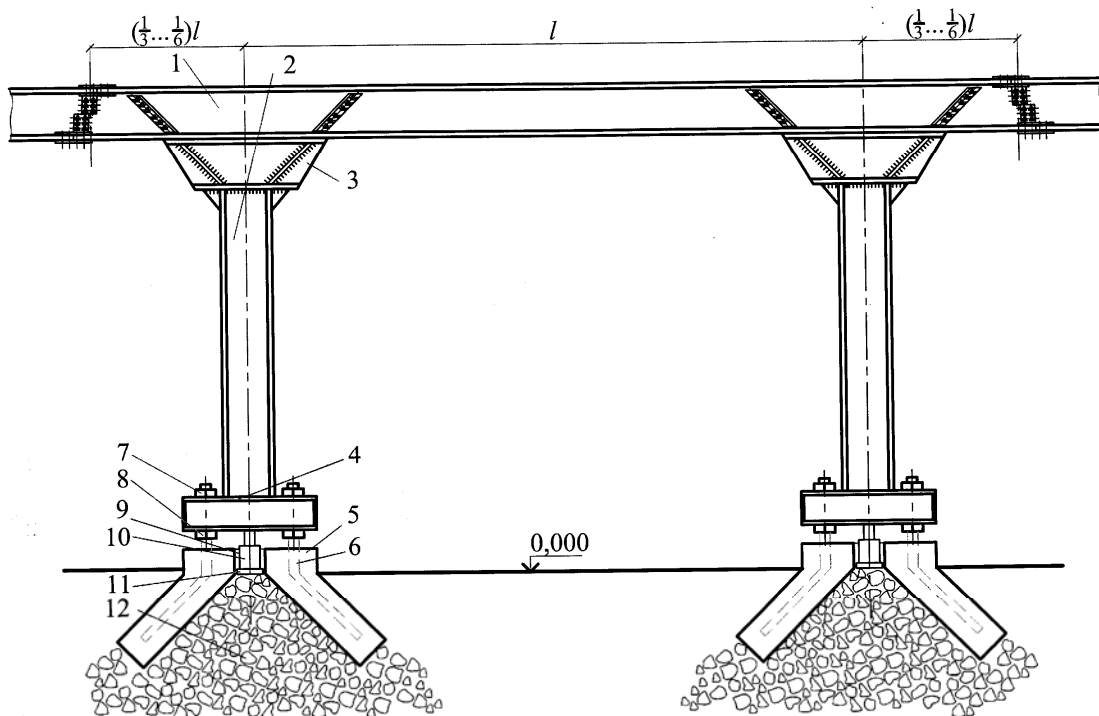


Рис.5.14. Портальная подкрановая конструкция (RU №22355673):

- 1 – двухконсольная подкрановая балка; 2 – колонны портала; 3 – оголовок-амортизатор; 4 – домкратная балка; 5 – фундамент с реактивным двигателем; 6 – анкерные болты; 7 – крепёжные гайки; 8 – рихтовочные гайки; 9 – ниша; 10 – домкрат; 11 – плунжер домкрата; 12 – реактивное сопло



Рельсоколёсный анкерный механизм содержит наклонные под углом  $45^0$  к вертикали колёса 1 транспортного средства с гребнями безопасности 2. Колёса 1 опираются на арочный рельс 3 в замке арки. Четырёхгранная глава 4 имеет две взаимно перпендикулярные поверхности для качения колёс 1 транспортного средства.

Под аркой рельса 3 имеется полость 5, предназначенная для амортизатора 6, выполняющего также функции фиксатора. Длина амортизатора 6 равна длине арочного рельса 3, а их стыки смещены друг относительно друга. Амортизатор 6 плотно вставлен в полость 5 под аркой рельса 3. Ветви арки имеют опорные пяты 7, опирающиеся на подрельсовую подкладку 8, имеющую продольный гофр 9 по всей длине арочного рельса 3. Стыки подрельсовой подкладки 8 и арочного рельса 3 смещены друг относительно друга.

Подрельсовая подкладка 8 изолирована диэлектрической прокладкой 10 от шпалы 11, ориентированной продольно. В шпале 11 имеется продольный гофр 12 по всей длине подрельсовой подкладки 8. Продольный гофр 12 шпалы 11 вдавлен в балласт 13 пути и чётко фиксирует шпалу 11.

Подрельсовая подкладка 8 опирается по всей её длине на продольную шпалу 11, расширяющуюся книзу и соединёна с ней болтами 15, с гарантированной затяжкой, исключающей сдвиги.

Рельсы 1 арочного профиля соединены с подрельсовой подкладкой 8 в монолитное целое посредством крюкообразных клемм 16. Каждая из этих крюкообразных клемм 16 имеет нижний крючок 17, упор 18 и консольный участок 19. На гребне подрельсовой подкладки 8 имеется упор 20. Под консольным участком 19 помещён эксцентрик 21 с рукоятью 22. Эксцентрик 21 при автоматическом повороте его на  $91...93$  градуса взаимодействует снизу с консольным участком 19 и упирается в упор 20 на гребне подрельсовой подкладки 8.

Известно решение, когда стандартный рельс вдвигается в подрельсовую подкладку [41]. Производство подрельсовых подкладок налажено для железной дороги, но после изготовления их режут на отдельные элементы. Считаем, что подрельсовая подкладка должна быть цельной, иметь ту же длину, что и рельс, и быть соединена с ним неподвижно.

В настоящее время имеются крановые и железнодорожные рельсы. Соотношение между высотой и шириной подошвы у кранового рельса составляет 1:1, а у железнодорожного – 1,27:1. Поэтому, железнодорожные рельсы хуже воспринимают горизонтальные воздействия от торможения тележек кранов. Тормозные силы вызывают значительные локальные крутящие моменты  $M_{\text{кру}}^{\text{loc}}$ . Если же объединить два железнодорожных рельса в рельсовый блок или объединить два рельса и прокатный тавровый профиль [18–21], то ширина таких рельсовых блоков будет значительной, моменты инерции кручения  $J_{\text{кру}}$  и изгиба  $J_{\text{X}}$  повышаются в несколько раз.

Техническая ошибка, возникшая при переходе от высококоресурсных клёпаных балок к сварным, будет устранена применением высококоресурсных фрикционных соединений и другой конструкцией подрельсовой зоны.

Изготовление рельсовых блоков следует автоматизировать на поточных линиях, подобных автоматической поточной линии на заводе им. Бабушкина [14]. Рельсовая сталь легирована и имеет прочность примерно в 3 раза выше, чем малоуглеродистая сталь. Однако, свариваемость её намного хуже, чем малоуглеродистой.

Поэтому рельсовые блоки должны быть соединены или заклёпками с внедряемыми сердечниками [59, 70] либо, пока выпуск таких соединительных элементов не налажен, высококоресурсными шпильками из высокопрочной стали «Селект» 40X или 38XC, винтовая спираль на которых накатана и выпуск которых налажен. Соединения должны выполняться неподвижными, то есть сдвиги одного элемента относительно другого должны быть исключены. Это достигается дробеструйной обработкой контактирующих поверхностей и затяжкой высококоресурсных шпилек или болтов с гарантией гайковёртом.

Для шпилек или болтов требуются отверстия, причём отверстия в разных элементах должны быть соосными. Удобно образовывать сквозные отверстия пиротехническим способом, простреливанием. При этом отверстия могут быть образованы в пакете – в нескольких элементах.

Пробивка сквозного отверстия пуансоном невозможна даже в двух элементах, а с помощью выстрела это можно сделать [59], причём качество отверстия получается значительно выше, чем при штамповке. Тем не менее, калибровку и повышение соосности отверстий следует совершить повторным рассверливанием развёрткой [14] или простреливанием калибратором. Эти манипуляции могут выполняться на поточной линии на посту образования отверстий пиротехническим способом.

## 5.9. Особенности конструирования узла крепления рельса к подкрановой балке

К узлу сопряжения рельса с подкрановой балкой рис.5.6, 5.7 [97] предъявляется несколько требований.

Во-первых, рельсы и рельсовые блоки должны обладать достаточными моментами инерции при кручении  $J_{кру}$  и изгибе  $J_x$ . Это необходимо, чтобы распределить локальные напряжения, циклически возникающие и пропадающие при прокатывании каждого из колёс мостовых кранов, на достаточную длину.

Во-вторых, крепление рельса или рельсового блока к подкрановой балке должно быть разъёмным, то есть на болтах или шпильках. Соединение

же самого рельсового блока может быть неразъёмным – то есть, например, заклёпки с внедряемым сердечником.

Лучшим вариантом являются фрикционные соединения, образующее замковое соединение рельсов в блок. В этом случае следует использовать автоматическое напряжение либо ослабление зажима рельсовых креплений [41, 42].

Рельсы приходится заменять часто – иногда чаще одного раза в год, поэтому процесс их замены должен быть механизирован. Необходимо шире внедрять способ замены рельсов их продольным перемещением без остановки движения по рельсам мостовых кранов [41, 42]. Устройства для такого способа монтажа разработаны, и на крупных металлургических комбинатах должны быть бригады, оснащённые известными устройствами для **автоматизированной замены рельсов, устройствами для автоматического напряжения и ослабления креплений рельсов.**

Соответственно должны применяться крепления, позволяющие осуществлять **автоматическое напряжение**, должны быть устройства для захвата и автоматического продольного перемещения рельсов [41, 42], устройство для рихтовки подкрановых балок как по высоте, так и в поперечном направлении [41]. Для этих целей удобно использовать массу кранов и поднимаемых ими грузов [78]. В этом случае подкрановые балки должны быть неразрезными. На действующих заводах и комбинатах во многих случаях при увеличении грузоподъёмности мостовых кранов приходится заменять разрезные подкрановые балки неразрезными. А неразрезные конструкции балки обладают замечательным свойством – позволяют приподнимать осевшие подкрановые балки за счёт отрицательных опорных реакций в неразрезной системе.

Превращая разрезные балки в неразрезные, мы переходим к управляемым конструкциям [66]. Причём управление перемещениями в благоприятную сторону производим автоматизированно с использованием массы крана с грузом [78].

#### 5.10. Новый принцип соединения рельса с верхним поясом подкрановой балки

Рельсы подкрановых конструкций имеют значительную площадь сечения по отношению к площади сечения подкрановой балки. Расход стали на рельс по отношению ко всему сечению составляет до 20 %, причём прочность стали рельса примерно в 3 раза выше, чем прочность стали подкрановой балки.

Рельс не учитывают в составе сечения балки, так как применяемые в настоящее время крепления не обеспечивают неподвижность его соединения с верхним поясом.

Применяемые крепления только фиксируют рельс на подкрановой балке в поперечном направлении. В продольном же направлении рельс **проскальзывает**. В результате проскальзывания рельс и балка изгибаются по отдельности, а не работают слитно как единое целое. Поэтому имеется значительный резерв повышения несущей способности всей подкрановой конструкции при переходе к неподвижным соединениям рельса с верхним поясом подкрановой балки.

Разработано несколько оригинальных технических решений, обеспечивающих неподвижное соединение рельса с балкой. Одно из первых решений – это фрикционное соединение рельса со специальной подрельсовой подкладкой (рис. 5.9, 5.10) [41, 42]. Рельс вдвигают между гребней подрельсовой подкладки принудительно, посредством домкратов-гидропульсаторов возвратно-поступательного действия.

Предварительно для увеличения сил трения контактирующие поверхности подошвы рельса и подрельсовой подкладки обрабатывают дробеструйным способом. После вдвиги рельса и подрельсовая подкладка работают слитно, как единый составной рельс. Благоприятное влияние на выносливость подрельсовой зоны и на несущую способность всей рельсобалочной конструкции оказывает неподвижное соединение рельса с подкрановой балкой. Подрельсовую же подкладку присоединяют неподвижно высокоресурсным фрикционным соединением к подкрановой балке, исключая продольные сдвиги.

В этом случае происходит *значительное увеличение* моментов инерции  $J_x$ ,  $J_y$  и моментов сопротивления  $W_x$ ,  $W_y$  рельсового блока, состоящего из рельса и подрельсовой подкладки. Ещё *большее увеличение*  $J_x$ ,  $J_y$ ,  $W_x$ ,  $W_y$  происходит у всей рельсобалочной конструкции при неподвижном соединении рельсового блока с подкрановой балкой, что, в свою очередь, приводит к *уменьшению материалоемкости* всей конструкции.

### 5.11. Новый принцип прикрепления тормозной балки к подкрановой

Принято рассчитывать подкрановую балку на восприятие вертикальных воздействий колёс кранов [103]. Тормозную же балку рассчитывают отдельно, – на горизонтальные воздействия колёс. То есть и здесь имеются значительные резервы по снижению материалоемкости.

Новый принцип конструирования тормозной балки заключается в выполнении её *симметричной* относительно вертикальной оси  $y$  (см. рис. 5.7) [41, 42]. Одновременно выбираем пониженное расположение тормозной балки, что позволяет снизить нормальные напряжения на краях её сечения.

Симметричное расположение тормозной балки позволяет включить площадь её сечения в состав подкрановой балки, увеличив таким образом суммарную площадь сечения на 20-25 %. Тормозную же балку рассчитываем, как обычно, в горизонтальной плоскости – на восприятие горизонтальных воздействий от колёс кранов.

## 5.12. Новый принцип конструирования тормозных балок

### Применяемые в настоящее время конструкции тормозных балок и их недостатки

Чаще всего в действующих цехах можно увидеть тормозную балку, состоящую из трёх элементов: верхнего пояса подкрановой балки, тормозного листа и внешнего пояса из швеллера листа или двутавра.

Соединение этих элементов обычно *нахлесточное* – то есть *самое неблагоприятное с точки зрения его выносливости* [8, с.138]. В этом случае эффективный коэффициент концентрации напряжений недопустимо высок  $K > 4$ . Поэтому нахлесточные швы, соединяющие тормозной лист с верхним поясом подкрановой балки, разрушаются от усталости преждевременно.

Соединение тормозной балки с подкрановой балкой в единую конструкцию упрощается и становится высокотехнологичным при выполнении его быстроразъёмным, фрикционным, с использованием высокоресурсных шпилек или болтов. Процессы транспортировки, быстрой и точной сборки упрощаются и автоматизируются. Для автоматизации сборки могут быть использованы заклёпки с внедряемыми пиротехническим способом сердечниками [59].

Единая подкрановая конструкция, состоящая из соединённых подкрановой и тормозной балок, образует несимметричное сечение. Главные оси такого сечения повернуты на некоторый угол, и сечение работает на *косой изгиб* не лучшим образом. Главные оси можно заставить принять вертикальную и горизонтальную ориентацию, наклонив стенку балки на определённый угол [60] (см. рис. 5.4 и 5.5).

## 5.13. Перспективы развития неразрезных подкрановых конструкций

При движении крана по неразрезным подкрановым балкам возникают изгибающие моменты как в пролётах, так и над опорами. Опорные реакции балок также меняют своё направление. При определённых положениях мостовых кранов возникают опорные реакции, отрывающие опорные участки подкрановым балок от колонн. Отсюда – два важных преимущества, возникающих при неразрезности подкрановых балок.

Первое важное преимущество – *простота рихтовки отметок рельсовых путей без какого-либо подъёмного оборудования (возникает управляемая конструкция)* [41, 42, 54]. Второе важное преимущество – материалоемкость неразрезных балок на 25...30 % меньше, чем разрезных.

Изгибающие моменты в неразрезных подкрановых балках легко определяются по автоматизированной программе, разработанной А. Щипалкиным, поэтому экстремумы значений моментов определять просто.

При движении мостового крана с грузом вдоль цеха в опорах подкрановой балки возникают как сжимающие, так и растягивающие опорные реакции. Поэтому для выполнения вертикальной рихтовки производят нивелировку рельсовых путей, составляют таблицу необходимых вертикальных перемещений балок на каждой из опор и отвёртывают гайки анкерных болтов на каждой конкретной колонне на проектную величину.

Затем загружают кран грузом и сообщают крану медленное качение вперёд вдоль цеха. Подкрановые балки на просевших опорах приподнимаются до упора в анкерные болты. В приподнятом состоянии балки легко перемещают в горизонтальном направлении и осуществляют также и поперечную рихтовку их, закрепив в проектном положении анкерными болтами.

Таким образом, неразрезная конструкция балок позволяет легко *управлять напряжённым состоянием конструкций и восстанавливать первоначальное проектное положение* рельсовых путей. Такое использование неразрезных подкрановых балок преобразует известный их недостаток – чувствительность к неравномерным осадкам опор в положительное свойство.

Эффект снижения материалоемкости в неразрезных балках можно легко увеличить, если увеличить их жёсткость над опорой (рис.5.11) [96]. В этом случае опорные изгибающие моменты увеличатся, а пролётные – уменьшатся. Такое изменение благоприятно, так как в этом случае *расширяется область применения прокатных двутавровых профилей. А замена сварных балок прокатными двутавровыми профилями* позволяет значительно повысить выносливость подкрановых конструкций, так как выносливость прокатных профилей *значительно* выше, чем выносливость сварных балок.

Применение же балок переменной жёсткости позволяет перейти к высокотехнологичному узлу соединения балок, обеспечивающему точный и безвыверочный монтаж [40].

Неразрезная балка состоит из прокатного двутаврового профиля, подкреплённого снизу над колоннами усиливающими двутаврами, консольно выступающими за грани колонны.

Двутаавры, усиливающие снизу подкрановые балки, могут быть из прокатных профилей. Усиливающие элементы удобно присоединять высокоресурсными болтовыми соединениями.

Монтажные марки состоят из двухконсольной балки, снабжённой двумя усиливающими элементами и соединёнными с балкой неподвижно.

Усиливающие элементы выступают за торцы двухконсольной балки и образуют консоли для опирания более коротких балок-вставок.

Для упрощения монтажа балок-вставок, стык двухконсольных балок и балок-вставок выполнен не по вертикали, а с уклоном  $0,1 \dots 0,125$ . Торцы двухконсольных балок и балок-вставок фрезерованы.

Конструкция может быть улучшена следующим образом. Усиливающая балка, находящаяся в промежутке между подкрановой балкой и колонной может быть заменена жёстким усиливающим треугольником из двух колонных двутаавровых профилей, образующих букву V (рис.5.11) [96]. Причём дополнительной стали не потребуется, так как внутренняя (подкрановая) ветвь колонны будет короче и из этой стали будет выполнен усиливающий V-образный элемент.

Для упрощения перевозки V-образные элементы снабжены фланцами и соединяются с подкрановой балкой в единое целое болтами на монтажной площадке. Затяжкой у V-образного элемента служит подкрановая балка. Подкрановая балка рассчитывается как неразрезная с чередованием большого и малого пролётов.

Итак, неразрезные подкрановые балки *имеют неоспоримые преимущества* по отношению к разрезным балкам, а именно:

1. Управление их осадками и напряжённым состоянием рихтовкой подкрановых конструкций с использованием массы крана и поднимаемого им груза.

2. Повышение работоспособности, так как применяются прокатные профили, обладающие значительно большими пределами выносливости по отношению к сварным двутаавровым балкам.

3. Снижение материалоемкости на  $25 \dots 30 \%$  по отношению к разрезным подкрановым балкам.

4. Обеспечение точного безвыверочного монтажа подкрановых балок.

5. Повышение надёжности всего подкранового пути.

## 5.14. Рельсы и рельсовые блоки для подкрановых конструкций

Рельсы появились вместе с железнодорожным транспортом. Основное назначение рельсов – служить направляющими для катящихся по ним колёс транспортных средств.

Колёса железнодорожного транспорта снабжены односторонними гребнями (ребордами), мостовые краны – двусторонними гребнями. Про-

свет между парой гребней колеса на 25...30 мм больше ширины главы рельса.

При качении колёс кранов по рельсам гребни неизбежно вступают в контакт с боковой поверхностью главы. Наряду с трением качения возникает во много раз большее трение скольжения гребня по боковой поверхности главы рельса. Продольное движение крана всегда сопровождается забеганием вперёд одной из его сторон, что приводит к возникновению пары встречных сил, стремящихся опрокинуть рельс. Возникают движущиеся вместе с колёсами крутящие моменты:

$$M_{\text{кру}}^{\text{loc}} = P^{\text{loc}} \cdot e + T^{\text{loc}} \cdot h_p,$$

где  $P^{\text{loc}}$  – вертикальная сила, приложенная с эксцентриситетом  $e$ ;  $T^{\text{loc}}$  – горизонтальная сила, приложенная с эксцентриситетом, равным высоте рельса.

В настоящее время прокатывают железнодорожные рельсы Р43, Р50, Р65, Р75 и специальные крановые рельсы КР80, КР100, КР120, КР140 [74, с.60]. Соотношение между высотой рельса  $h_{\text{рел}}$  и шириной подошвы  $b_{\text{рел}}$  у железнодорожного равно 1,28...1,18, а у кранового рельса высота и ширина подошвы равны  $h_{\text{рел}}=b_{\text{рел}}$ . Поэтому крутящие моменты  $M_{\text{кру}}^{\text{loc}}$  при применении железнодорожных рельсов получаются больше на 28...20 %, что неблагоприятно с точки зрения выносливости подрельсовой зоны стенки балки.

При монтаже подкрановых балок может возникнуть серьёзный дефект – несоответствие расстояния между плоскостями вращения колёс расстоянию между рельсами (рельсовой колее). Такой дефект монтажа подкрановых балок вызывает расклинивающие или стягивающие воздействия, передающиеся на подкрановые балки горизонтально [3, 6, 41]. При больших отклонениях происходит закатывание колёс гребнями на главу рельса, в экстремальном случае сопровождающееся проваливанием колёс крана с одной или другой сторон рельса. Попросту – кран сходит с рельсов. Сход крана сопровождается сильнейшим ударом колёс по верхнему поясу балки и характерными вмятинами в нём.

Дефект монтажа должен быть устранён рихтовкой подкрановых балок на консолях колонн и ни в коем случае не перемещением рельсов в поперечном направлении по верхним поясам балок.

К сожалению, в действующих цехах общепринято перемещать рельс в поперечном направлении по верхним поясам подкрановых балок. Это приводит к значительным (20...60 мм) эксцентриситетам рельсов по отношению к оси стенки каждой из балок и преждевременному (через 0,7...0,75 млн циклов) появлению усталостных трещин в подрельсовой зоне стенок балок.

Горизонтальные воздействия  $\pm T^{\text{loc}}$  возникают и при торможении тележки крана. По актуализированной редакции СНиП «Нагрузки и



воздействия» [5] их принимают  $\pm T^{loc} = 0,2 P^{loc}$ , то есть считают, что силы торможения возникают за счёт сил трения, при коэффициенте трения сталь по стали  $\mu \approx 0,18$ . По исследованиям С.А. Ницеты [56], горизонтальные силы  $\pm T^{loc}$  при перекосах моста крана и взаимодействии гребней колёс с рельсами возникают в несколько раз большие.

В настоящее время изготавливают мостовые краны с безребордными колёсами. В этом случае гребни (реборды) колёс заменяют направляющие ролики [8, Т.2, с.411]. Это **эффективное техническое решение**, так как сопротивление продольному движению крана уменьшается примерно **в два раза**.

Замена колёс на безребордные и установка на кранах направляющих роликов приводит к следующим положительным изменениям:

- уменьшению расхода электроэнергии на движение крана примерно **в два раза**;
- уменьшению истираемости, износа рельсов **в два раза**;
- значительному уменьшению локально крутящего момента  $M_{кр}^{loc}$ ;
- уменьшению массы редукторов и электродвигателей;
- **значительному уменьшению общей массы кранов**.

К сожалению, это техническое решение применяется крайне редко. Замена устаревших подкрановых конструкций новыми конструкциями, даёт значительный экономический эффект.

### 5.15. Новые эффективные профили рельсов, использующих природные аналогии

В настоящее время прокатывают железнодорожные и крановые рельсы [74, с.60]. У крановых рельсов высота  $h_{рел}$  равна ширине  $b_{рел}$ . Толщина шейки у кранового рельса примерно в два раза больше. Однако сталь крановых рельсов более низкого качества. Более десяти лет назад были изобретены **арочные** профили крановых и железнодорожных рельсов.

Арочные рельсы эффективней, чем прокатываемые в настоящее время до **10 раз** [97, 100]. В природе арка встречается часто. Пещеры имеют арочные своды. Такой профиль свода препятствует его обрушению. Деревья укрепляются в почве, имея арочную конструкцию корней, зубы закреплены в челюсти арочными корнями рис. 5.15.

Арочная конструкция рельсов позволяет легко преобразовать горизонтально приложенную силу  $T$  в пару реактивных сил  $F$ :

$$Th = Fb \Rightarrow F = Th/b.$$

Человек давно научился использовать данную конструкцию, найденную природой: арочные мосты перекрывают ущелья и пропасти, широко известны арочные акведуки в Риме и так далее.

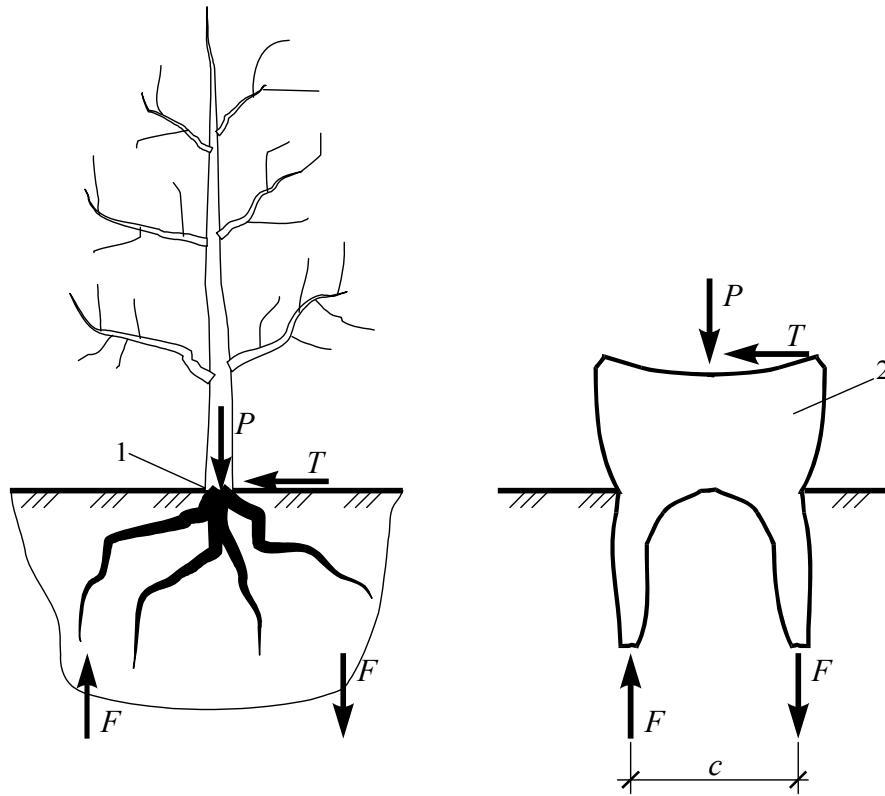


Рис.5.15. Природные арки в корнях дерева и зуба человека

Арочные рельсы рис. 5.16 неизбежно вытеснят рельсы, применяемые в настоящее время, но, к сожалению, внедрение этого процесса затягивается.

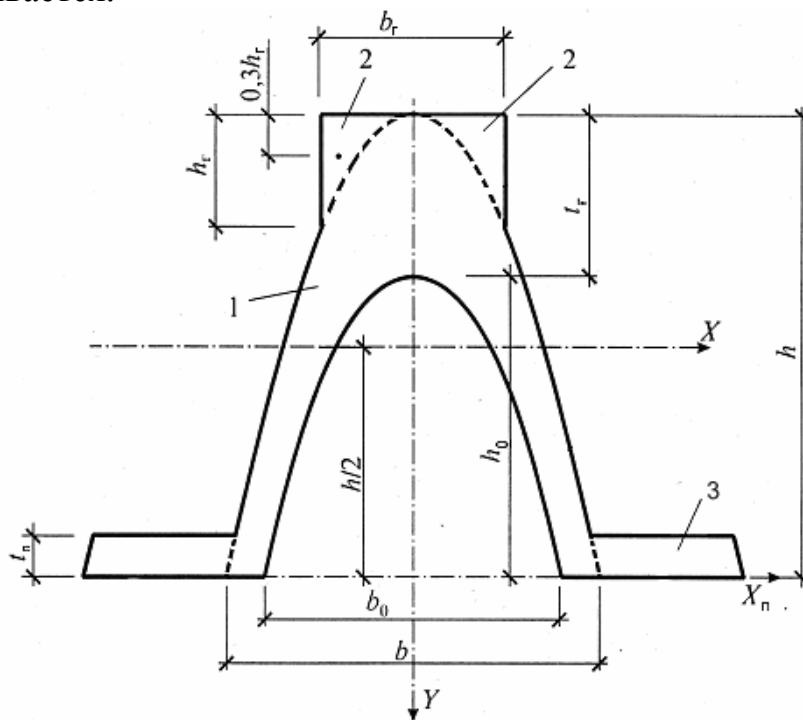


Рис.5.16. Сечение арочного амортизирующего профиля рельса:  
 1 – параболическая арка; 2 – параболические треугольники, образующие главу рельса; 3 – подошвы арочного рельса, являющиеся опорными пятнами арки рельса [97, 99]

Арочный рельс состоит из собственно арки 1, выделенной внешней и внутренней параболами. Арка 1 имеет переменную толщину. По мере приближения к вершине (замку) арки толщина ветвей увеличивается. Глава рельса образована двумя параболическими треугольниками 2, составляющими с главой единое целое. Две подошвы 3 в виде параллелограммов составляют с ветвями арки единое целое (рис. 5.16).

Особенность арочного рельса – его сбалансированность относительно осей  $X$  и  $Y$ . Равенство статических моментов верхней и нижней половин рельса относительно оси  $X$  обеспечивает его балансировку:

$$S_{x \text{ верх}} = S_{x \text{ нижн.}}$$

Балансировка приводит к равенству верхнего и нижнего моментов сопротивления:

$$W_{x \text{ верх}} = W_{x \text{ нижн.}},$$

то есть ось  $X$  делит высоту рельса  $h_{\text{рел}}$  точно пополам.

Конструкция нового арочного рельса оказалась удачной. Составлен сортament арочных рельсов (табл.5.2, 5.3).

Все параметры арочных рельсов намного превосходили параметры применяемых в настоящее время железнодорожных и крановых рельсов [83, с.60] (см. табл. 5.2, 5.3).

Т а б л и ц а 5 . 2

Размеры арочных рельсов параболического профиля, см, см<sup>2</sup>

Рельс	$b_{\Gamma}$	$b-b_0$	$b$	$b_{\max}$	$2b_{\Pi}$	$h$	$t_{\Gamma}$	$A_{\Pi}$	$A_{2V}$
2. Арочные железнодорожные рельсы									
Э Р75	7,32	1,8	16,86	26,08	9,22	30,53	2,5	19,92	14,02
Э Р65	7,29	1,6	16,80	26,72	9,92	26,98	2,25	18,644	12,35
Э Р50	6,96	1,4	15,66	25,90	10,23	22,22	2	15,961	10,16
Э Р43	6,74	1,2	15,64	25,92	10,29	21,15	1,75	14,4	8,83
3. Арочные крановые рельсы									
Э КР50	5	1,0	11,28	16,08	4,801	17,555	1,6	9,603	5,74
Э КР60	6	1,2	13,51	19,89	6,383	19,633	1,8	12,766	7,74
Э КР70	7	1,6	15,18	23,15	7,968	20,650	2,1	15,936	10,24
Э КР80	8	1,7	17,27	27,37	10,09	22,152	2,3	20,184	12,66
Э КР100	10	1,8	21,78	36,74	14,95	25,700	2,6	29,909	18,05
Э КР120	12	1,8	27,21	48,03	20,82	31,147	2,8	41,651	24,23
Э КР140	14	2,0	31,81	58,07	26,25	33,575	3,0	52,503	30,33

Таблица 5.3

Площади сечения, моменты инерции, моменты сопротивления,  
масса арочных рельсов параболического профиля

Рельс	$A$ см <sup>2</sup>	$J_x$ см <sup>4</sup>	$W_x$ см <sup>3</sup>	$J_y$ см <sup>4</sup>	$W_y$ см <sup>3</sup>	$J_p$ см <sup>4</sup>	Масса кг	$\gamma$
Арочные железнодорожные рельсы								
Э Р75	95,7	11956	783	4128	317	16084	75,125	0,434
Э Р65	82,6	8257	612	3713	278	11970	64,841	0,434
Э Р50	65,9	4547	409	2723	210	7270	51,732	0,444
Э Р43	57	3643	345	2397	185	6040	44,745	0,431
Арочные крановые рельсы								
Э КР50	38,02	1593	181	738	92	2331	29,846	0,443
Э КР60	50,99	2693	274	1448	146	4142	40,027	0,444
Э КР70	67,22	3854	373	2420	209	6274	52,768	0,461
Э КР80	81,84	5491	496	3986	291	9477	64,244	0,463
Э КР100	113,44	10610	826	9524	518	20134	89,050	0,459
Э КР120	150,69	21489	1380	21053	877	42542	118,29	0,441
Э КР140	187,24	31344	1867	37190	1281	68535	146,98	0,44

Кроме того, такие отличные показатели арочных рельсов дополняются и таким, как наличие у рельса **естественной амортизирующей способности!** Применяемые в настоящее время рельсы таким свойством не обладают. Амортизирующая способность возникла опять же благодаря арочной конструкции.

Затяжкой арки является подрельсовая подкладка или верхний пояс подкрановой балки.

Железнодорожный арочный рельс может быть легко установлен на обычную балку. Для центрирования рельса к верхнему поясу присоединяется центрирующий элемент, равный высоте полости рельса. У рельса появляется дополнительная центрирующая опора, поддерживающая главу рельса снизу. Усилия с главы рельса на центрирующую опору передаются за счёт контактного взаимодействия главы рельса с центрирующим элементом. В этом случае горизонтальные силы  $\pm T^{loc}$  передаются на главу рельса.

Если же применить трёхглавый арочный рельс [84, 82, 86, 87], то крутящий момент от горизонтальных сил  $\pm T^{loc}$  будет вообще снижен до нуля.

Центрирующий элемент может быть выполнен в виде *овального профиля*, заранее вставленного в полость трёхглавого рельса (рис.5.13).

К сожалению, прокат *амортизирующих арочных* рельсов ещё не освоен и поэтому приходится проектировать рельсовые блоки из существующих рельсовых профилей.

## 5.16. Модернизация существующих конструкций и внедрение нового принципа конструирования

В действующих цехах зачастую [3, 5, 6, 38, 40–42, 45] эксплуатируются балки с трещинами в подрельсовой зоне, что **запрещено** нормами. Однако имеется возможность восстановления работоспособности этих балок без остановки их эксплуатации на продолжительное время. Суть метода состоит в том, чтобы исключить повреждённые усталостными трещинами подрельсовые зоны этих балок из работы, преобразовать балки в новые, удовлетворяющие новому принципу конструирования и тем самым перевести их работу в зону так называемой «неограниченной выносливости».

Например, этого можно добиться, сместив старые балки наружу цеха (ближе к верхним частям колонн, на консолях которых они уложены) и уложив на их место новые, выносливые балки. При этом мы можем продолжать использовать старые балки, но уже в новой роли – объединив их в единое целое с новыми балками. Таким образом, мы получаем «двойную» балку с замкнутым коробчатым профилем [104], прекрасно воспринимающую крутящие воздействия от колёс мостовых кранов, имеющую коробчатое сечение и работающую в зоне неограниченной долговечности.

Поясним этот принцип на конкретном примере. Для восприятия вертикальных воздействий изготавливают новые балки, являющиеся, например, двухпролетными, с верхним поясом из пары симметричных коробчатых профилей, неподвижно соединённых со стенкой легированными шпильками (сталь 40 X «Селект») с гарантированной затяжкой и соосно закреплёнными на них рельсами.

Оснащают тележку мостового крана гидродомкратами, соединёнными двухконсольной траверсой и тягами для подвески упомянутых балок, оснащают нижние пояса старых балок опорными консолями, выступающими внутрь цеха на ширину новых балок для опирания устанавливаемых.

Выполняют в торцовой стене здания на отметке торца старых балок монтажное отверстие по габаритам сечения новых балок, монтируют направляющий лоток для подачи новых балок снаружи торца цеха и закрепляют на нём сверху скользкие подкладки, например, из винипласта.

Подают новую балку на направляющий лоток и заводят её конец через монтажное отверстие внутрь цеха на максимально возможную длину, подвешивают этот передний конец, используя гидродомкраты, к тележке мостового крана, шарнирно прикрепляют балку к мостовому крану жёсткой горизонтальной сцепкой.

Буксируют балку внутрь цеха на всю её длину и опускают на опорные консоли, прикреплённые к нижним поясам старых заменяемых балок, отцепляют конец балки от мостового крана и своим ходом перемещают его к центру тяжести новой балки.

Подвешивают новую балку подвесками к паре гидродомкратов, установленных на тележке мостового крана, поддомкрачивают ее на 100...120 мм выше опорных консолей и транспортируют продольно вдоль цеха к месту монтажа.

Совмещают передний конец новой балки со стыком старых балок, поперечным перемещением тележки крана устраняют зазор между тремя старыми и новой балками, опускают гидродомкратами новую балку на опорные консоли, по всей длине соединяют её с этими консолями и с верхним поясом старой балки.

Отцепляют все подвески и своим ходом перегоняют кран к торцу цеха за следующей новой балкой, монтируют монтажные устройства с гидродомкратами на уступах колонн, с пульта включают гидродомкраты и предварительно их напрягают, удерживая соединённые старые и новые балки.

Циклы повторяют до установки и закрепления к старым балкам новых на всём участке, затем движение кранов на этом участке останавливают, отсоединяют тормозные балки и крепления старых балок к колоннам по всей длине новой трёхпролётной балки.

Вновь включают гидродомкраты монтажных устройств, преодолевают силы трения и перемещают соединённые старые и новые балки в поперечном направлении наружу к колоннам, скользя по уступам колонн, вытесняют новой балкой старые до заранее выставленных упоров.

Рихтуют рельсовые пути вместе с балками до проектного положения, контрят крепления, вновь присоединяют тормозные балки, циклы повторяют до полной замены балок на выбранном участке, затем процесс повторяют до полной замены балок с данной стороны цеха, затем – до полной замены всех исчерпавших технический ресурс балок с другой стороны цеха.

Дополнительно соединяют новую плеть подкрановых балок с колоннами рихтующими устройствами, монтируют демонтированную тормозную балку и эксплуатируют новую плеть балок.

## 5.17. Способы повышения выносливости подрельсовой зоны стенки подкрановой балки

1. Снижение циклических локальных внешних воздействий  $P^{loc}$ ,  $T^{loc}$ , передаваемых от колёс кранов.

- ✓ применение амортизаторов и рессор;
- ✓ уменьшение эксцентриситета  $e$  силы  $P^{loc}$  и эксцентриситета  $h_p$  силы  $T^{loc}$  (установка рельса по центру и трёхглавые рельсы).

2. Распределение циклических локальных воздействий  $P^{loc}$ ,  $T^{loc}$  на большую длину балки, то есть увеличение  $l_{ef}$  для  $P^{loc}$ ,  $T^{loc}$ . Увеличение  $l_{ef}$  для  $P^{loc}$  достигается:

- ✓ увеличение мощности рельса (ограничено КР-140);
- ✓ увеличением мощности верхнего пояса с одновременной заменой низкоресурсного сварного соединения в подрельсовой зоне высокоресурсным соединением легированными шпильками с гарантированной затяжкой [105];
- ✓ увеличением толщины стенки  $t_{ст}$ ;
- ✓ конструктивно, посредством выполнения верхнего пояса из замкнутых трубчатых профилей. В этом случае моменты инерции пояса  $J_{xп}$  при изгибе и кручении  $J_{кру.п}$  увеличиваются **в 200...300 раз!**

3. Повышение выносливости с использованием нового принципа конструирования – удаление из подрельсовой зоны балок низкоресурсных сварных соединений. Этот принцип конструирования позволяет повысить работоспособность стали в подрельсовой зоне столь значительно, что локальные сдвигающие напряжения не в состоянии повредить подрельсовую зону усталостными трещинами. Подрельсовая зона начинает работать в зоне так называемой «неограниченной долговечности».

4. Соединение элементов верхнего пояса подкрановой балки с её стенкой высокоресурсным соединением: заклёпками с внедрёнными в них сердечниками или шпильками и болтами из легированной закалённой стали, обеспечивающими высокую выносливость подрельсовой зоны стенки балки.

### 5.18. Балка высокой выносливости, разработанная с применением нового принципа конструирования

Известно, что трубчатые замкнутые профили обладают в сотни раз большими моментами инерции при кручении  $J_{кру}$  и изгибе  $J_x$  их. Поэтому проблема выносливости подрельсовой зоны решается при конструировании этой зоны из коробчатых замкнутых профилей (рис. 5.17). При этом переход к новой конструктивной форме осуществлён как посредством усиления действующих конструкций без их демонтажа, как описано в предыдущем разделе, так и изготовлением новых подкрановых балок с коробчатыми замкнутыми профилями верхнего пояса.

Новая конструктивная форма подкрановой балки, предназначена для подкрановых путей кранов с тяжёлым режимом работы  $8K$ ,  $7K$  и интенсивной эксплуатацией (600...700 тысяч прокатываний колёс кранов в год).

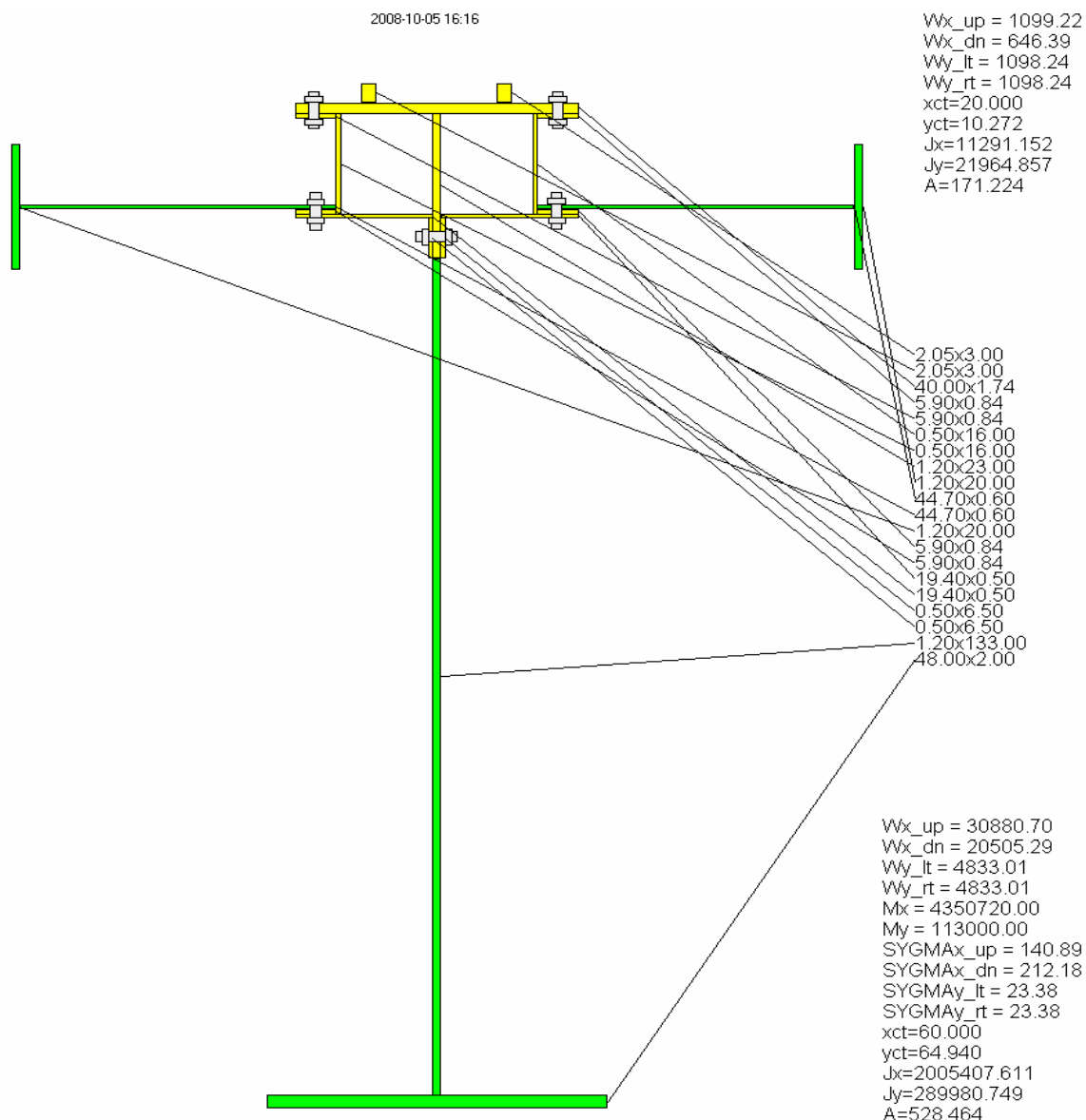


Рис. 5.17. Сечение подкрановой балки с коробчатым, замкнутым верхним поясом. Опорные рёбра и элементы, подкрепляющие тормозную балку, не показаны

Отличие заключается в конструкции её верхней части. Верхний пояс состоит из подрельсовой подкладки, имеющей продольные гребни для фиксации, и надёжного, без проскальзывания, закрепления рельса. Подрельсовая подкладка плотно контактирует по всей длине с фрезерованным верхним торцом стенки балки, сварной шов отсутствует. Стенка плотно контактирует и поддерживает подрельсовую подкладку снизу. Соединение же подрельсовой подкладки со стенкой осуществлено в обход наиболее напряжённой её зоны посредством швеллеров, ориентированных полками наружу, и уголков, также ориентированных полками наружу. Отверстия в соединяемых элементах образованы пиротехническим или обычным образом с прошивкой их пуансоном. Сборка новой подкрановой балки выполняется на поточной линии. Высокая точность отверстий и их соосность достигается развёртыванием их на проектный диаметр в сборке.



Сборка подкрановой балки осуществляется на поточной линии высоко-ресурсными соединениями – заклёпками с внедряемыми сердечниками или легированными шпильками (40Х «Селект») с гарантированной затяжкой гаек гайковёртом.

Проверим выносливость разрезной подкрановой балки с коробчатым верхним поясом (см. рис.5.17) при тех же воздействиях, при которых проводилась проверка выносливости сварной подкрановой балки. Габариты элементов балки даны на самом рисунке (поскольку использованная программа для расчёта параметров сечения не может работать напрямую с элементами неправильной формы, швеллеры, уголки и подрельсовая подкладка «собраны» из элементов прямоугольного сечения). В верхнем правом углу рисунка даны параметры верхнего пояса (подрельсовая подкладка, швеллеры, уголки, верхняя часть стенки). Циклические колебания напряжений в подрельсовой зоне возникают при прокатывании колёс кранов ( $P_{экр} = 4480$  гН, см. табл. 4.4). Характеристики элементов верхнего пояса следующие: подрельсовая подкладка –  $40 \times 1,74$  см с выступами  $2,05 \times 3$  см, швеллеры №16, гнутые неравнобокие уголки –  $19,4 \times 7 \times 0,5$  см, статический момент  $S_{x.в.п} = 11209,2$  см<sup>3</sup> (в запас прочности – без учёта симметричной тормозной балки).

При подсчёте момента инерции на кручение верхнего пояса верхней частью стенки и свисающими частями уголков пренебрегли также в запас прочности. Вычисления были произведены по формуле, приведённой в справочнике под редакцией М.М. Гохберга [8, с.387]:

$$J_{кр} = \gamma \frac{4A^2}{\sum \frac{s}{t}} = \gamma \frac{4(h \cdot b)^2}{2 \frac{h}{t_h} + \frac{b}{t_{1b}} + \frac{b}{t_{2b}}} = \frac{4 \cdot (28,2 \cdot 18,24)^2}{2 \frac{18,24}{0,5} + \frac{28,2}{0,5} + \frac{28,2}{1,74}} = 7270,2 \text{ см}^4.$$

где в числителе – квадрат площади  $A$  контура сечения заключённой внутри замкнутой осевой линии контура,  $s$  – стороны периметра;  $\sum s/t$  берётся по всей длине замкнутой осевой линии;  $\gamma = 1$  – поправочный коэффициент, для сечений, исключаяющих сдвиги, и **0,3** для клёпанных соединений;  $h$  – высота сечения пластинки;  $b$  – ширина сечения, а  $t$  – толщина их.

Проверка выносливости балки с коробчатым верхним поясом при рельсе КР-100, установленном без эксцентриситета ( $e = 0$ ), приведена в табл.5.4.

Коэффициент  $\gamma = 1$  ввиду того, что в балке применены фрикционные соединения с высоким техническим ресурсом, исключаяющие проскальзывание рельса. По сравнению со сварной балкой [3] момент инерции верхнего пояса на кручение **увеличен примерно в 45 раз** и превысил момент инерции рельса на кручение почти **в 10 раз**. Прочие параметры, используемые при проверке выносливости:  $J_{x.в.п} = 11291,2$  см<sup>4</sup>,  $J_x$

$J_{\text{рел}}=2445,3 \text{ см}^4$ ,  $t_{\text{ст}}=1,2 \text{ см}$ . Таким образом, момент инерции верхнего пояса на изгиб **увеличен в  $\approx 280$  раз** и превысил момент инерции рельса на изгиб в  **$\approx 15$  раз**.

Разработанная конструкция подразумевает поперечную рихтовку балки на консолях колонн при сохранении положения рельса между выступов подрельсовой подкладки – то есть **с нулевым эксцентриситетом рельса ( $e = 0$ )**, чем объясняется величина  $M_{\text{кру}}^{\text{loc}}$ .

Моменты инерции коробчатого верхнего пояса новой балки при кручении и изгибе по сравнению с моментами инерции верхнего пояса из листа в обычной сварной балке увеличились: при кручении:  **$J_{\text{кр}}$  примерно в 45 раз, при изгибе:  $J_{\text{x}}$  примерно в 280 раз!**

### Эффективная длина каждой из волн локальных напряжений

Циклы меняются при прокатывании каждого из колёс кранов. Рельс является макрорегулятором локальных напряжений в подрельсовой зоне стенки, так как увеличение рельса приводит к увеличению моментов инерции рельса при изгибе  $J_{\text{x}}^{\text{рел}}$  и  $J_{\text{кр}}^{\text{рельс}}$  кручении, что благоприятно влияет на локальные напряжения в подрельсовой зоне [3, 4].

Балка из прокатных профилей. Рельс применяем прямоугольный [102, 105].

$$l_{\text{ef}} = 4,5 \times \sqrt[3]{\frac{\sum (J_{\text{x}}^{\text{рел}} + J_{\text{x}}^{\text{пояс}})}{t_{\text{ст}}}} = 4,5 \times \sqrt[3]{\frac{7427,2 + 11291,2}{1,2}} = 112,44 \text{ см}.$$

Экстремум крутящего момента возникает со стороны. Рельс смонтирован без эксцентриситета ( $e_{\text{рел}} = 0$ ). Крутящий момент возникает от сил торможения  $\pm T =$  увеличивает сжатие (-) в стенке со стороны эксцентриситета рельса ( $e_{\text{рел}} = 2 \text{ см}$ )  $P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} = 6048$ ;  $T_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} = 0,2 \cdot P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} = 0,2 \cdot 6048 = 1209,6 \text{ гН}$   
 $M_{\text{кру}}^{\text{loc}} = -P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} \cdot 0 - T_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} \cdot h_{\text{рел}} = -1209,6 \cdot 23,17 = -28026,43 \text{ гНсм}.$

### Колебания циклических локальных напряжений при качении колёс кранов

1. Минимум напряжений (кран отсутствует):  $\sigma_{\text{y}}^{\text{loc}} = 0$ ,  $\tau_{\text{xy}}^{\text{loc}} = 0$ .

2. Если рельс установлен без эксцентриситета  $e = 0$  и горизонтальные тормозные силы отсутствуют  $\leftrightarrow T = 0, 2P = 0$ , то кручение рельса и верхнего пояса не возникает, сжимающие напряжения под колесом с одной и другой стороны стенки балки одинаковы (сжатие)

$$\sigma_{\text{y}}^{\text{loc}} = \frac{-P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}}}{l_{\text{ef}} \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{-6048}{112,44 \cdot 1,2} = -44,83 \text{ МПа} \downarrow P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} = -6048 \text{ гН}.$$

Экстремумы сжимающих и сдвигающих напряжений в стенке, возникают при прокатывании каждого из колёс кранов. Колебания напряжений  $\sigma_y^{\text{loc}}$  в стенке *отнулёвые* (от нуля до экстремума).

3. Если рельс установлен без эксцентриситета  $e = 0$  и горизонтальные тормозные силы присутствуют  $\leftrightarrow T_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} = 0, 2P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} = 1009,9 \text{ гН}$ , то кручение рельса и верхнего пояса возникает  $M_{\text{Кру}}^{\text{loc}} = -P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} \cdot e_{\text{рел}} - T_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} \cdot h_{\text{рел}}$ , сжимающие напряжения под колесом с одной стороны стенки увеличиваются, а с другой стороны балки уменьшаются. Более опасны сжимающие напряжения.

4. Если рельс установлен с эксцентриситета  $e = 2 \text{ см}$  и горизонтальные тормозные силы присутствуют  $\leftrightarrow T = 0, 2P$  и действуют с эксцентриситетом равным высоте рельса  $h_{\text{рел}}$ , то возникший крутящий момент увеличивается  $M_{\text{Кру}}^{\text{loc}} = -P_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} \cdot e_{\text{рел}} - T_{\text{ЭКВ}}^{\text{loc}} \cdot h_{\text{рел}} = 0 - 1009,9 \cdot 23,14 = 28026,43 \text{ гНсм}$ . Кручение рельса и верхнего пояса, а сжимающие напряжения под колесом с одной стороны стенки увеличиваются, а с другой стороны стенки уменьшаются. Со стороны эксцентриситета возникают максимальные сжимающие напряжения, которые действуют с *отнулёвыми* циклами и опасность их возрастает.

$$\sigma_{\text{укр}}^{\text{loc}} = \frac{-2M_{\text{Кру}}^{\text{loc}} \cdot t_{\text{ст}}}{\sum J_{\text{Кру}}^{\text{рельс}} + J_{\text{Кру}}^{\text{пояс}}} = \frac{-2 \cdot 28026,43 \cdot 1,2}{2445,3 + 11291,2} = -4,9 \text{ МПа}.$$

5. Сумма нормальных сжимающих локальных напряжений от нуля до экстремума (отнулёвые)  $\sum (\sigma_y^{\text{loc}} + \sigma_{\text{укру}}^{\text{loc}}) = -44,83 - 4,9 = |49,7| < 88,6 \text{ МПа}$  выносливость *обеспечена*.

6. Амплитуды колебания циклов сдвигающих напряжений  $\tau_{2\text{max}} = \sum 0,5 \cdot (\sigma_y^{\text{loc}} + \sigma_{\text{укру}}^{\text{loc}}) = -0,5 \cdot 49,7 = -24,9 \text{ МПа}$  (амплитуда  $0,5 \cdot \tau_{2\text{max}} = |24,9| < 42,2 \text{ МПа}$ ) выносливость *обеспечена*.

7. Амплитуды симметричных колебаний циклов сдвигающих напряжений  $\sum \tau_{\text{аху}}^{\text{loc}} = \pm(0,3 \cdot \sigma_y^{\text{loc}} + 0,25 \cdot \sigma_{\text{укру}}^{\text{loc}}) = |0,3 \cdot 49,7 + 0,25 \cdot 4,96| = 16,2 < 42,2 \text{ МПа}$  выносливость *обеспечена*.

Для определения характера циклов нагружений введём понятие амплитудного коэффициента сдвигающих напряжений:

$$A_{\tau} = \frac{\tau_{\text{а}}^{\text{loc}}}{\tau_{\text{экт}}^{\text{loc}}},$$

где  $\tau_{\text{а}}^{\text{loc}}$  – амплитуда колебаний сдвигающих напряжений;  $\tau_{\text{экт}}^{\text{loc}}$  – экстремум сдвигающих напряжений.

В соответствии с рассчитанной диаграммой выносливости делаем следующие проверки при прямоугольном рельсе КР-140:

1. Циклы колебаний напряжений симметричные, амплитудный коэффициент  $A_\tau = 1$ . Предел выносливости  $\tau_{a \text{ предел}}^{\text{вын}} = 42,2$  МПа. Проверку произведём по результатам испытаний балок первой группы (сварка автоматическая с К-образной разделкой кромок, провар на всю толщину стенки балки):  $\tau_a^{\text{loc}} = 26,58 > \tau_{a \text{ предел}}^{\text{вын}} = 22,5$  МПа ( $R_v$ ). Амплитуда действующих напряжений превышает предельную амплитуду, следовательно, *выносливость не обеспечена*, усталостные трещины в данной балке возникнут раньше накопления 6 миллионов циклов прокатываний колёс кранов. Обратим внимание на то, что по результатам испытаний балок *второй и третьей* групп пределы выносливости значительно меньше, следовательно, *выносливость не обеспечена* тем более, усталостные трещины возникнут раньше.

2. Циклы колебаний напряжений отнулёвые, амплитудный коэффициент  $A_\tau = 0,5$ :  $\tau_{\text{экстр}}^{\text{loc}} < R_{\text{вын}}^{\text{loc}}; \tau_{\text{экстр } A=0,5}^{\text{loc}} = 40,38 < R_{\text{вын}, A=0,5}^{\text{loc}} = 46,93$  МПа.

Для определения характера циклов нагружений используем амплитудный коэффициент:

$$A_\tau = \frac{\tau_a^{\text{loc}}}{\tau_{\text{экстр}}^{\text{loc}}},$$

где  $\tau_a^{\text{loc}}$  – амплитуда колебаний сдвигающих напряжений;  $\tau_{\text{экстр}}^{\text{loc}}$  – экстремум

их; средние напряжения:  $\tau_m = \tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_{X_{\text{пол}}}}{J_X \cdot t_{\text{ст}}}$ .

Выносливость балки обеспечена при амплитудах:  $\tau_{a \text{ } A=1} < \tau_{A=1}^{\text{loc}};$   
 $\tau_{a \text{ } A=0,5} < \tau_{A=0,5}^{\text{loc}}; \tau_{\text{экстр}} < \tau_{\text{пред.вын}}^{\text{loc}}$

С учётом средних напряжений  $\tau_{\text{пред.вын}}^{\text{loc}} = \tau_{A=1}^{\text{loc}} + \tau_m \cdot \text{tg } \psi_H$ .

Экстремум сдвигающих напряжений  $\tau_{\text{экстр}} = \tau_{xy} + \sum \tau_{axy}^{\text{loc}}$ .

По результатам исследований для балок с высокоресурсными соединениями (сварной шов заменён на заклёпки с внедряемыми сердечниками либо высокоресурсные шпильки с гарантированной затяжкой) имеем следующие значения:

$$\tau_{A=1}^{\text{loc}} = 42,2 \text{ МПа}; \tau_{A=0,5}^{\text{loc}} = 88,0 \text{ МПа}; \text{tg } \psi_H = 1,04$$

Производим предварительные вычисления:

а) средние напряжения цикла

$$\tau_m = \tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_{X_{\text{пол}}}}{J_X \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{4375 \cdot 11209,2}{1745101,9 \cdot 1,2} = 23,4 \text{ МПа};$$

б) экстремум цикла

$$\tau_{\text{экстр}} = \tau_{xy} + \sum \tau_{axy}^{\text{loc}} = 23,4 + 15,64 = 39,04 \text{ МПа}$$

Производим проверку:

при симметричных циклах:

$$\tau_{a A=1} = 15,64 < 42,2 \text{ МПа},$$

при отнулёвых циклах:

$$\tau_{a A=0,5} = 26,23 < 88,0 \text{ МПа},$$

при средних напряжениях

$$\tau_{\text{экстр}} = 39,04 < \tau_{\text{пред.вын}}^{\text{loc}} = 42,2 + 23,1 \cdot 1,04 = 66,5 \text{ МПа} .$$

Проверка показывает, что выносливость балки обеспечена при накоплении 6 миллионов циклов нагружений – при этом в каждой проверке **имеется запас в 1,7...3,3 раза**, что указывает на то, что работоспособность балки можно гарантировать и на большой период времени её эксплуатации и следует ожидать её работу в зоне так называемой **«неограниченной долговечности»** [41, 42].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ближайшим прототипом мостовых кранов являются паровозы, локомотивы, вагоны железнодорожного транспорта. При сопоставлении мостовых кранов с паровозами и локомотивами выявлен **парадокс** – мостовые краны являются *единственными* из всех транспортных механизмов, которые лишены гениального изобретения человека: *рессор, пружин, амортизаторов, демпферов*, гасящих динамику воздействий колёс рельсового транспорта на рельсы, мосты, путепроводы. Мостовые же краны передают динамику воздействий колёс на рельсы и далее на подкрановые балки и узлы креплений конструкций, без какого-либо смягчения. Как ни странно, но нет более ни одного транспортного средства, лишённого рессор.

Отсутствие рессор приводит к возрастанию динамики воздействий колёс не только на подкрановые балки, но и на конструкции мостовых кранов, кроме того, снижает срок их безопасной эксплуатации.

В тридцатых годах XX века без проведения экспериментальных исследований была произведена неадекватная замена высокоресурсных клёпаных подкрановых балок низкоресурсными сварными балками. В результате этого были потеряны регулирующие функции мощного верхнего клёпаного пояса, технический ресурс и выносливость подрельсовой зоны стенки по сравнению с клёпаными балками были значительно снижены, то есть была допущена техническая ошибка.

Такой технической ошибки в мостовых железнодорожных конструкциях допущено не было. В конструкциях железнодорожных мостов применяли и применяют высокоресурсные соединения: высокопрочные легированные болты (сталь 40 X «Селект») с гарантированной затяжкой гаек, а также клёпаные соединения.

Подкрановые конструкции эксплуатируются при динамических воздействиях колёс мостовых кранов, поэтому на первое место выдвигается их выносливость и способность воспринимать динамические воздействия колёс кранов, а не статические их воздействия.

Гашение динамики воздействий колёс кранов необходимо, поэтому следует применять амортизирующие устройства и гасители колебаний напряжений.

Расчёт на выносливость подрельсовой зоны подкрановых балок следует выполнять на базе не менее **шести** миллионов циклов локальных воздействий при прокатывании колёс кранов.

Проведённые экспериментальные и теоретические исследования по повышению технического ресурса и срока безопасной эксплуатации подкрановых балок при интенсивном, тяжёлом режиме работы мостовых кранов, открывают перспективы совершенствования методов расчёта и

проектирования подкрановых конструкций достаточной выносливости и с техническим ресурсом, обеспечивающим минимальный срок эксплуатации.

Несмотря на большой объём проведённых исследований, внедрение в практику и в действующие нормы проектирования новых конструкций остаётся низким, что приводит к применению низкоресурсных сварных соединений и преждевременному возникновению усталостных трещин в подрельсовой зоне стенки подкрановых балок, приводящих к выходу конструкций из строя.

Для получения надлежащего положительного эффекта необходимо, чтобы процесс проектирования и эксплуатации подкрановых сооружений был построен с учётом возникающих динамических, циклических воздействий при качении колёс мостовых кранов.

Динамику воздействий, возникающую при качении колёс мостовых кранов можно в значительной степени погасить поддрессированием колёс. Пока выпуск мостовых кранов с поддрессированием колёс не освоен промышленностью, необходимо применять демпфирующие, амортизирующие устройства в узлах крепления рельсов и подкрановых конструкций, также гасящих опасные циклические колебания локальных напряжений в подрельсовой зоне.

Достаточный технический ресурс по выносливости подрельсовой зоны подкрановых балок может быть обеспечен более широким применением прокатных профилей с использованием высокоресурсных фрикционных соединений шпильками или болтами (сталь 40 X «Селект»), а также заклёпками с внедряемыми сердечниками. Технологичность изготовления при применении таких соединений также повышается, что снижает трудоёмкость изготовления.

Подкрановые конструкции следует эксплуатировать с минимальными отклонениями от проектного положения, а при нарушении проектного положения должны быть предусмотрены специальные устройства, возвращающие их в проектное положение без остановки производственного процесса.

В данной работе обобщён накопленный экспериментальный материал по статистической обработке испытаний на выносливость. Разработана программа для автоматизированной статистической обработки результатов испытаний на выносливость, позволившая автоматизировать построение регрессионных зависимостей в логарифмических координатах, связывающих величину циклических локальных сдвигающих напряжений и число циклов до появления усталостных трещин.

Существенно уточнён способ учёта рассеяния результатов усталостных испытаний при построении линии пределов выносливости в координатах натуральных логарифмов. Корректный учёт рассеяния позволил

существенно уточнить положение этой линии при отнулёвых колебаниях сдвигов и получить прогноз выносливости при заданном уровне сдвигающих напряжений с отнулёвыми колебаниями.

Впервые получены новые регрессионные зависимости на базе 10 млн циклов прокатываний колёс мостовых кранов, связывающие величину амплитуд симметричных колебаний сдвигающих напряжений с числом циклов до появления первых усталостных трещин. Впервые построена линия пределов выносливости для симметричных колебаний и линия прогноза выносливости при заданном уровне сдвигающих напряжений с симметричными циклами.

Получены пределы выносливости для К-образных сварных швов как с отнулёвыми, так и с симметричными циклами на базе 10 млн циклов прокатываний колёс кранов.

Разработана программа для автоматического построения диаграммы пределов выносливости и построены диаграммы пределов выносливости, позволяющие производить проверку выносливости при произвольном амплитудном коэффициенте.

Произведён сравнительный анализ результатов усталостных испытаний подкрановых балок, выполненный различными авторами. Выявлено, что сварные швы в подрельсовой зоне стенки наиболее подвержены возникновению опасных усталостных трещин.

Разработан новый принцип выравнивания выносливости узловых соединений подкрановых балок позволивший разрабатывать подкрановые балки, выдерживающие более **10 млн** циклов прокатывания колёс кранов, и гарантировать невозможность возникновения усталостных трещин в таких балках на протяжении порядка 15 лет интенсивной эксплуатации при режиме работы кранов 8К...7К. Новизна технических решений защищена патентами России.

Разработана технология восстановления работоспособности разрезных подкрановых балок, повреждённых усталостными трещинами в подрельсовой зоне. Эта технология позволяет полностью восстановить работоспособность без демонтажа балок и без остановки производственного процесса, например, в мартеновском цеху.

Обоснован переход к неразрезным (двухпролётным) подкрановым балкам ввиду их превосходства над разрезными по ряду существенных параметров: широкого использования прокатных профилей, обеспечения технологичности изготовления, обеспечения управления осадками и перемещениями подкрановых балок воздействием массой крана с грузом, увеличения на 33...35 % несущей способности и значительное увеличение работоспособности.

Автоматизирован и визуализирован трудоёмкий процесс поиска максимального изгибающего момента и поперечной силы с получением



распечатки неблагоприятных положений кранов в одном и другом случае, что позволило выявить: а) в каком случае необходимо вести расчёт на два сближенных крана и в каком случае только на один; б) необходимую величину сближения колёс сцепки из двух кранов, позволяющую минимизировать величину  $M_{\max}$  и  $Q_{\max}$  (величина сближения не должна быть меньше максимального расстояния между колёсами кранов).

Автоматизирован и визуализирован трудоёмкий процесс подбора сечений подкрановой балки, соединённой в единое целое с тормозной балкой. Предложены новые типы их сечений. Выполненный анализ позволил выявить недостаточную надёжность шаблонного сварного узла соединения верхнего пояса из листа со стенкой балки.

Предложены различные варианты рельсовых блоков, объединяющих рельс и верхний пояс в монолитную конструкцию, устраняющую допущенную в прошлом веке техническую ошибку, приводящую к недостаточной долговечности подкрановых балок.

Автоматизирован и визуализирован трудоёмкий процесс расчёта подрельсовой зоны на выносливость, что позволило разработать новый принцип конструирования этой зоны – удаление опасных концентраторов напряжений из наиболее напряженной зоны на такое расстояние, где они не снижают долговечности конструкции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила производства и приёмки работ. Металлические конструкции [Текст]: СНиП Ш-18-75. – М., 1976. – 161 с.
2. Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий ОРД 0000089 [Текст]. – М.: МИНЧЕРМЕТ, 1989. – Вводится в действие с 3.08.1989. – 98 с.
3. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции [Текст]/ Госстрой СССР. – М., 1990. – 96 с.
4. Актуализированной редакции СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции [Текст]. – М., 2011. – 172 с.
5. СНиП II.01.07-85. Нагрузки и воздействия [Текст]. – М.: Госстрой СССР, 1987. – 96 с.
6. Актуализированной редакции СНиП II.01.07-85. Нагрузки и воздействия [Текст]. – М., 2013.
7. Хомутильников, Н.И. Металлические конструкции промышленных зданий [Текст] / Н.И. Хомутильников, К.Д. Морозов. – Л.-М.: Госстройиздат, 1933. – 536 с.
8. Справочник по кранам [Текст]: в 2 т. Т.2. Характеристики и конструктивные схемы кранов. Крановые механизмы, их детали и узлы. Техническая эксплуатация кранов / М.П. Александров, М.М. Гохберг.
9. Справочник по кранам [Текст]: в 2 т. Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчёта кранов, их приводов и металлических конструкций / В.И. Брауде [и др.]; под общ. ред. М.М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.
10. Сабуров, В.Ф. Закономерности усталостных повреждений и разработка метода расчётной оценки долговечности подкрановых путей производственных зданий [Текст]: дис.... д-ра техн. наук / В.Ф. Сабуров. – Челябинск, 2002. – 388 с.
11. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий [Текст] / А.И. Кикин [и др.]; под ред. А.И. Кикина. – М.: Стройиздат, 1969. – 415 с.; 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 302 с. под ред. А.И. Кикина.
12. Камбаров, В.И. Влияние технологических факторов на характеристики крановых нагрузок, ресурс и долговечность сварных подкрановых балок в цехах металлургического производства [Текст]: дис.... канд. техн. наук / В.И. Камбаров. – М.: МИСИ, 1988. – 236 с.
13. Нежданов, К.К. Способ гарантирования заданной выносливости К-образного сварного шва в подрельсовой зоне стенки двутавровой подкрановой балки [Текст]/ К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин // «Строительная механика и расчёт сооружений». – 2008. – № 1 – С. 52–57.

14. Расчёт, проектирование и изготовление сварных конструкций [Текст]: учеб. пособие для машиностроительных вузов / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа, 1971. – 760 с.

15. Патрикеев, А.Б. О механизме разрушения верхних участков стальных подкрановых балок [Текст]/ А.Б. Патрикеев //Промышленное строительство. – 1971. – №5.

16. Нежданов К.К., Нежданов А.К., Туманов В.А., Мамонов В.В. Рельсовый блок. RU №2191739. М., Кл. В 66 С 6/00, 7/08. Бюл. №.30. Зарег.27.10.2002.

17. Нежданов К.К., Туманов В.А. Нежданов А.К., Мамонов В.В. Рельсовый блок и способ восстановления подкрановой конструкции. RU №2213041. М., Кл. В 66 С 6/00, 7/08. Бюл. №.27. Зарег.27. 09.2003.

18. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К. Рельсовый блок. RU №2216621. М., Кл. Е 01 В 23/10, В 66 С 7/08. Бюл. №.27. Зарег.27. 09.2003.

19. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К., Лаштанкин А.С. Рельсовый блок. RU №2235677. В 66 С 7/00, Е 01 В 9/00. Бюл. №.25. Зарег.10. 09.2004.

20. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Рельсовое стыковое соединение. RU №2062827. Действует с 27.9.96.

21. Нежданов, К.К. Эффективные профили арочных рельсов [Текст]: учебное пособие / К.К. Нежданов, В.А. Туманов, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 100 с.

22. Нежданов, К.К. Конструирование и расчёт подкрановых балок с трубчатым верхним поясом [Текст]: учебное пособие / К.К. Нежданов, М.А. Карев. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 96 с.

23. Лампси, Б.Б. Металлические тонкостенные несущие конструкции при локальных нагрузках [Текст] / Б.Б. Лампси. – М.: Стройиздат, 1979. – 272 с.

24. Кошутин, Б.Н. Определение коэффициента вертикальной крановой нагрузки на основании статистического изучения работы кранов в действующих цехах [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / Б.Н. Кошутин. – М.: МИСИ, 1961. – 26 с.

25. Кунин Ю.С. Исследование процессов нагружения стальных подкрановых балок вертикальными крановыми нагрузками в цехах металлургического производства [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / Ю.С. Кунин. – М.: МИСИ, 1970. – 15 с.

26. Карев М.А. Новая стальная подкрановая конструкция. Методы расчета прочности и выносливости [Текст]: дис.... канд. техн. наук / М.А. Карев. – Пенза, 2002.

27. Броуде, Б.М. Распределение сосредоточенного давления в металлических балках [Текст] / Б.М. Броуде.– М-Л.: Стройиздат, 1950. – 95 с.

29. Спенглер, И.Е. Экспериментальное исследование работы подкрановых балок [Текст] // Тр. МИСИ. – М., 1950. – № 7.

30. Фигаровский, А.В. Исследование горизонтальных поперечных воздействий мостовых кранов с гибким подвесом груза на конструкции промышленных зданий [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / А.В. Фигаровский. – М.: МИСИ, 1969.

31. Кудишин Ю.И. Контактные задачи о подкреплениях и пересечениях тонких пластин (применительно к металлическим конструкциям) [Текст]: автореф. дис.... д-ра техн. наук / Ю.И. Кудишин. – М.: МИСИ, 1986. – 25 с.

32. Рывкин, Э.А. Напряжённое состояние элементов стальных тонкостенных стержней в зоне приложения локальных нагрузок [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / Э.А. Рывкин. – М.: МИСИ, 1978. – 22 с.

33. Юшкевич, В.Н. Исследование крановых балок с рельсом над стенкой [Текст]: дис.... канд. техн. наук / В.Н. Юшкевич. – Л.: Ленинградский П.И., 1969.

34. Нежданов, К.К. Исследование выносливости сжатой зоны стенки стальных сварных подкрановых балок [Текст]: дис.... канд. техн. наук / К.К. Нежданов. – М.: МИСИ, 1974. – 133 с.

35. Балдин, В.А. Расчёт на выносливость верхней зоны стенки подкрановой балки [Текст] / В.А. Балдин, В.М. Горпинченко, А.С. Лазарян // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1976. – №4.

36. Федосеев, В.П. Экспериментально-теоретическое исследование усталостной прочности сжатой зоны стенки сварной подкрановой балки [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / В.П. Федосеев. – М., 1975.

37. Бабкин, В.И. Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжёлого режима работы [Текст]: дис.... канд. техн. наук / В.И. Бабкин. – М., 1986.

38. Горпинченко, В.М. Разработка метода расчёта на выносливость и создание надёжных и эффективных конструкций балок для подвижной нагрузки [Текст]: дисс. докт. техн. наук / В.М. Горпинченко. – М.: ЦНИИСК, 1983. – 328 с.

39. Нежданов, К.К. О повышении долговечности стальных подкрановых балок [Текст] / К.К. Нежданов // Общие вопросы строительства. Отечественный опыт: реф. сб. ЦИНИС Госстроя СССР. – 1974. – Вып. 12.

40. Васюта, Б.Н. Подкрановая балка со сменной подрельсовой частью [Текст]: дис.... канд. техн. наук / Б.Н. Васюта – Новосибирск: Новосибирский ИСИ, 1990.

41. Нежданов, К.К. Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчета [Текст]: дис.... д-ра техн. наук / К.К. Нежданов. – Пенза, 1992. – 349 с.

42. Нежданов, К.К. Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчёта. (Лауреат конкурса на медали и дипломы РААСН строительных наук 2011 г. 16.02.2012 г.) [Текст]: моногр./ К.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 288с.

43. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К., Тихонов К.Б. Стенд для испытания подкрановых балок на выносливость. RU №2191363. М., Кл. G 01 М 3/20. G 01 N 3/20. Бюл №24. Зарег.20.10.2002

44. Нежданов К.К. Стенд для испытания балок на выносливость, а. с. №0840679, СССР. М. Кл.3 E 01 В 9/48.// Бюл. № 44 – 1981.

45. Металлические конструкции [Текст]: в 3-х томах. Т-3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытания конструкций зданий и сооружений / под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М., 1998.

46. Чумаков, В.А. Увеличение ресурса эксплуатации подкрановых балок путём подкрепления пояса продольными рёбрами [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук / В.А. Чумаков. – Новосибирск: ИСИ, 1987. – 18 с.

47. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений [Текст]/ ред. А.А. Уманский. – М.: Стройиздат, 1960. – 1040 с.

48. Руководство по проектированию стальных подкрановых балок [Текст]/ Госстрой СССР. ЦНИИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ. – М., 1976. – С.112.

49. Нежданов, К.К. Напряжения в анизотропной стенке балки от сосредоточенной нагрузки, передаваемой через рельс [Текст] / К.К. Нежданов // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1991. – №3. – С. 27–29.

50. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний [Текст]: справочник / Л.М. Школьник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.

51. Леонтьев, Н.Л. Техника статистических вычислений [Текст] / Н.Л. Леонтьев. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 251 с.

52. Нежданов, К.К. О корреляционной связи локальных сдвигающих напряжений в К-образном шве в подрельсовой зоне подкрановых балок с числом циклов прокатывания колёс мостовых кранов [Текст] / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 2007. – №6.

53. Нежданов, К.К. Результаты сравнения регрессионных зависимостей между числом циклов до появления усталостных трещин и величиной сдвигающих напряжений для сварных балок и балок с поясами из тавров [Текст] / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 2008. – №2. – С.13.

54. Нежданов, К.К. Долговечные подкрановые конструкции [Текст]: учебное пособие / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, А.Ю. Бороздин. – Пенза: ПГУАС, 2010. – 180 с.

55. Малышкина, И.Н. Вопросы статической и вибрационной прочности неразрезных балок [Текст] / И.Н. Малышкина // Тр. ЦНИИСК. – 1967.

56. Ницета, С.Д. Исследование воздействий мостовых кранов на стальные колонны промышленных зданий [Текст] / С.Д. Ницета // Труды Магнитогорского горно-металлургического института.

57. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К., Кузьмишкин А.А. Узел упругого соединения трёхглавого рельса с подкрановой балкой RU №2249557. М., Кл. В 66 С 7/00 Зарег. 10.04.2005 Бюл. № 10.

58. Незальзов О.Р., Савело В.М. Металлическая подкрановая балка: а. с. №1469059. СССР. М. Кл. Е 04 С 3/06// Бюл.№12 – 1989.

59. Васильев, А.В. Разработка конструкций соединений на нестандартных крепёжных элементах для восстановления подкрановых балок с усталостными трещинами [Текст]: дис.... канд. техн. наук / А.В. Васильев. – Пенза, 1998.

60. Попчёнков, И.В. Новые профили крановых рельсов. Прочность и долговечность рельсобалочных конструкций [Текст]: дис.... канд. техн. наук / И.В. Попчёнков. – Пенза, 2000.

61. Нежданов К.К., Нежданов С.К., Крапчин В.В., Елизаров Ю. В. Крепление рельса к подкрановой балке: а. с. №1562370, СССР, М. Кл. Е 01 В 9/00, В 66 С 7/00// Бюл 17. – 1990.

62. Нежданов К.К., Нежданов С.К. Подкрановая балка: а.с.№1594118, СССР. М. Кл. В66 С 6/00 // Бюл.№35 – 1990.

63. Абаринов, А.А. Технология изготовления стальных конструкций / А.А. Абаринов [и др.]. – М.: Госстройиздат, 1963. – 307 с.

64. Муханов, К.К. Металлические конструкции [Текст] / К.К. Муханов. – М.: Стройиздат, 1978.

65. Серия 1.420.2-27. Выпуск 3. Подкрановые балки и пути подвешенного транспорта. Госстрой СССР.1990.

66. Абовский, Н.П. Управляемые конструкции: КРАС/ГАСА [Текст] / Н.П. Абовский. – Красноярск, 1998.– 433 с.

67. Нежданов К.К., Мишанин И.Н., Иллюстров Г.Б. Способ замены кранового рельса: а. с. №0358248, СССР, М. Кл. В66С 7/08// Бюл. №33– 1972.

68. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К. Рельсовый блок. RU №2216621. М., Кл. Е 01 В 23/10, В 66 С 7/08. Бюл №.27. Зарег.27. 09.2003.

69. Нежданов К.К. Устройство для регулирования напряжений рельсовых креплений: а. с. №0922220, СССР. М. Кл. Е 01В 29/24// Бюл. №15–1982.

70. Нежданов К.К., Васильев А.В., Калмыков В.А., Нежданов А.К. Способ и устройство для неподвижного соединения. RU №2114328. Бюл. №18 – 27.06.1998.

71. Васильев А.В., Нежданов К.К., Никулин В.В., Нежданов А.К. Устройство для соединения рельсов в непрерывную плеть. RU №2285079. E01B 11/36 B60M 5/00. Бюл. №28. Опубликовано 27.01.2004.

72. Нежданов К.К., Рубликов С.Г., Нежданов А.К. Замковое соединение рельсов в блок. RU №2295601. М., Кл. E01B 5/02, E01B 9/44, B66C 7/08, B66C 6/00. Бюл. №8. Опубликовано 20.03.2007.

73. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Рельсовая подкрановая конструкция а.с. №2053187. Бюл. №3, 1996.

74. Сахновский, М.М. Справочник конструктора строительных сварных конструкций [Текст] / М.М. Сахновский. – Днепропетровск: Промінь, 1975. – 273 с.

75. Металлические конструкции (техническая эксплуатация) [Текст] / М.М. Сахновский [и др.]; под ред. М.М. Сахновского. – Киев: Будивельник, 1976. – 256 с.

76. Нежданов К.К. Автоматическое устройство для захвата и продольного перемещения кранового рельса, а.с. №0678012, СССР, М. Кл., В 66 С 1/42// Бюл. № 29 – 1979.

77. Нежданов К.К., Нежданов С.К., Богданов Г.И. Способ замены рельса рельсового пути: а.с. №1146353, СССР, М. Кл. E 01 В 29/16// Бюл. №11–1985.

78. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Способ рихтовки подкранового пути. RU №2104362. Бюл. № 14 зарег. 10.02.1998.

79. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Устройство Неждановых для усиления подкрановой конструкции. RU №2067646 Бюл. №28, зарег. 10.10.1996.

80. Нежданов К.К., Нежданов А.К., Туманов В.А., Карев М.А. Подкрановая транспортная конструкция. RU №2192383. М., Кл. В 66 С 6/00, 7/08. Бюл №.31. Зарег.10.11.2002.

81. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Подкрановый рельс: RU №2081044. Приоритет от 8.10. 1993. Бюл. №27– 1996.

82. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Подкрановый рельс. RU №2081049. Приоритет изобретения от 12.10.93. Бюл №16. 10.06.1997. Трёхглавый.

83. Нежданов К.К., Нежданов А.К., Тамбовцев Е.Н. Способ и устройство усиления подкрановой балки. RU №2126768. Бюл. №6. Зарег. 27.02.1999. Рельс арочный трёхглавый.

84. Нежданов К.К. Амортизирующие подкрановые конструкции: Учебное пособие / К.К. Нежданов, М.А. Карев, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 128 с.

85. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К., Кузьмишкин А.А. Узел упругого соединения трёхглавого рельса с подкрановой балкой RU №2249557. М., Кл. В 66 С 7/00 Зарег. 10.04.2005 Бюл. № 10.

86. Нежданов К.К., Нежданов С.К. Металлическая подкрановая балка: а. с. №1625811, СССР, М. Кл. В 66 С 6/00 // Бюл.№5 – 1991.
87. Нежданов К.К., Нежданов С.К. Подкрановый путь: а. с. №1484801, СССР, М. Кл. В 66 С 7/00// Бюл. № 21 – 1989.
88. Путевое хозяйство [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. /И.Б. Лехно [и др.]; под ред. И.Б. Лехно. – М.: Транспорт, 1990. – 472 с.
89. Нежданов К.К., Нежданов А.К., Туманов В.А. Подкраново-подстропильная балка. RU №2235674. В 66 С 5/00, 7/00. Бюл №.25. Зарег.10. 09.2004.
90. Металлические конструкции подъёмно-транспортных машин [Текст]/ М.М. Гохберг. – М.: Машиностроение, 1969. – 250 с.
91. Нежданов К.К., Нежданов С.К. Металлическая подкрановая балка, а. с. №1301763, СССР, М. Кл. Е 01 В 3/04// Бюл. № 13. 1987.
92. Нежданов К.К. Подкрановый путь. а. с. №1221185, СССР, М. Кл. В 66 С 7/02// Бюл. №12 – 1986.
93. Нежданов К.К., Нежданов С.К. Устройство для крепления подкранового пути к колонне: а. с. №1525113, СССР, М. Кл. В 66 С 6/00// Бюл.№44 – 1989.
94. Нежданов К.К. Устройство для крепления рельса: а. с. №0914695, СССР, М. Кл.<sup>3</sup> Е 01 В 9/48// Бюл. № 11 – 1982.
95. Нежданов К.К., Нежданов С.К. Подкрановый путь: а. с. №1248937, СССР, М. Кл. В 66 С 7/00// Бюл. № 29 – 1986.
96. Нежданов К.К., Туманов В.А., Нежданов А.К., Лаштанкин А.С. Портальная подкрановая конструкция. RU №2235673. М., Кл. В 66С7/00. Бюл.№25. 10.09.2004.
97. Нежданов К.К. Рельсы эффективного профили и их крепления [Текст]: учебное пособие / К.К.Нежданов, В.А.Туманов, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2011.–108 с.
98. Нежданов К.К. Амортизирующие подкрановые конструкции [Текст]: учебное пособие / К.К. Нежданов, М.А. Карев, А.К. Нежданов. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 128 с.
99. Металлические конструкции [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Н.С. Стрелецкий [и др.]; под ред. Н.С. Стрелецкого. – 3-е изд. перераб. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. – 776 с.
100. Нежданов К.К. Новые принципы конструирования П-образной рамы здания [Текст]: монография / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, А.К. Нежданов, П.В. Куничкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – с. 251.
101. Нежданов. К.К., Карев М.А., Кузьмишкин А.А., Рубликов С.Г., Нежданов А.К. Многоколёсный мостовой кран. RU №2296098. Бюл. №9. Опубликовано 27.03.2007.



102. Нежданов, К.К. Применение толстостенных двутавровых кра-  
новых рельсов [Текст] / К.К. Нежданов, А.А. Кузьмишкин, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3 (14). – С. 79–84.

103. Нежданов, К.К. Решение проблемы обеспечения достаточной  
выносливости и ресурса интенсивно эксплуатирующихся подкрановых  
балок [Текст] / К.К. Нежданов, А.А. Лаштанкин, Д.Х. Курткеев // Строительная механика и расчёт сооружений». – 2013. – № 5 – С. 41–47.

104. Нежданов, К.К. Быстросооружаемая подкрановая балка с  
высоким техническим ресурсом эксплуатации [Текст] / К.К. Нежданов,  
Д.Х. Курткеев, А.А. Лаштанкин // Строительная механика и расчёт  
сооружений. – 2014. – № 3. – С. 67–73.

105. Мостовые и металлургические краны [Текст] / К.С. Богинский  
[др.]. – М.: Машиностроение, 1970. – 300 с.

106. RU 2467075 С2 Нежданов К.К., Нежданов А.К., Артюшин Д.В.  
Способ проката горячекатаной арматуры периодического профиля. МПК  
С21D8/08 (2006.01), В21Н1/18 (2006.01). Опубликовано: 20.11.2012. Бюл.  
№32.

107. Писаренко, Г.С. Справочник по сопротивлению материалов  
[Текст] / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наукова  
думка, 1975. – 704 с.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК.....	5
1.1. Совершенствование конструкций подкрановых балок .....	5
1.2. Воздействия колёс кранов на подкрановые конструкции в эксплуатируемых цехах .....	6
1.3. Автоматизация процесса изготовления балок на поточных линиях..	8
1.3. Рельс-макрорегулятор напряжённого состояния подрельсовой зоны стенки .....	9
1.4. Сечения испытываемых балок .....	15
2. СТЕНДЫ, ИМИТИРУЮЩИЕ ПОДВИЖНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОЛЁС МОСТОВЫХ КРАНОВ.....	17
2.1. Исследования локального напряжённого состояния в стенке балки .....	17
2.2. Имитация подвижных воздействий колёс кранов на подкрановые балки и получение линий регрессии .....	17
3. ИСПЫТАНИЯ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК НА ВЫНОСЛИВОСТЬ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИХ КОНСТРУКЦИИ .....	27
3.1. Испытания на выносливость сварных подкрановых балок .....	27
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА БАЛОК НА ВЫНОСЛИВОСТЬ .....	37
4.1. Недостатки ранее используемого расчёта.....	37
4.2. Построение регрессионной зависимости числа циклов колебаний до появления усталостных трещин от амплитуд симметричных циклов сдвигающих циклических локальных напряжений .....	37
5. ТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ТИПЫ СЕЧЕНИЙ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК И РЕЛЬСОБАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ НАПРЯЖЁННЫМ СОСТОЯНИЕМ.....	63
5.1. Неблагоприятные последствия изменения конструктивной формы верхнего, наиболее нагруженного пояса подкрановых балок .....	63
5.2. Особенности циклов локальных воздействий $\downarrow P^{loc}$ , $\leftrightarrow T^{loc}$ , $M_{кр}^{loc}$ , возбуждаемых колёсами мостовых кранов.....	68
5.3. Влияние изгибных и крутильных характеристик рельсов на локальные напряжения в подрельсовой зоне стенки балки .....	68
5.4. Способы повышения выносливости подрельсовой зоны подкрановых балок.....	72
5.5. Новый принцип конструирования подкрановых балок.....	73
5.6. Новый принцип конструирования .....	78

5.7. Новые принципы конструирования выносимых подкрановых балок.....	79
5.8. Рельсовые блоки .....	83
5.9. Особенности конструирования узла крепления рельса к подкрановой балке.....	90
5.10. Новый принцип соединения рельса с верхним поясом подкрановой балки .....	91
5.11. Новый принцип прикрепления тормозной балки к подкрановой ..	92
5.12. Новый принцип конструирования тормозных балок.....	93
5.13. Перспективы развития неразрезных подкрановых конструкций ...	93
5.14. Рельсы и рельсовые блоки для подкрановых конструкций .....	95
5.15. Новые эффективные профили рельсов, использующих природные аналогии.....	97
5.16. Модернизация существующих конструкций и внедрение нового принципа конструирования .....	101
5.17. Способы повышения выносимости подрельсовой зоны стенки подкрановой балки .....	102
5.18. Балка высокой выносимости, разработанная с применением нового принципа конструирования .....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	110
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	114

Научное издание

Нежданов Кирилл Константинович  
Нежданов Алексей Кирилович

**РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫНОСЛИВОСТИ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК  
ПРИ ТЯЖЁЛОМ РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Монография

Редактор        В.С. Кулакова  
Верстка         Н.А. Сазонова

---

Подписано в печать 6.02.15. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 7,21. Уч.-изд.л. 7,75. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.  
Заказ №70.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.