

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

КУБАСЕВИЧ АНТОН ЕВГЕНЬЕВИЧ

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫЕ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ
СОСТОЯНИЯ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ
ТРЕЩИНАМИ В СТЕНКЕ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Г.И. Белый

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В СТЕНКЕ	14
1. 1. Общие сведения об эксплуатации подкрановых балок с трещинами в стенке.....	14
1. 2. Анализ исследований оценки эксплуатационной пригодности подкрановых балок с трещинами	20
1. 2. 1. Вероятностный подход к оценке остаточного ресурса подкрановой балки с трещинами.....	21
1. 2. 2. Оценка остаточного ресурса подкрановой балки с применением критериев на базе механики разрушения	24
1. 2. 3. Оценка эксплуатационной пригодности на основе фактического напряженно-деформированного состояния подкрановой балки.....	26
1. 3. Анализ исследований по повышению долговечности подкрановых балок	29
1. 4. Выводы по первой главе.....	36
ГЛАВА 2. УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕНОК ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С ТРЕЩИНАМИ В ЗОНЕ СЖАТОГО ПОЯСА.....	37
2. 1. Постановка задачи, гипотезы и допущения, обоснование расчетной модели подкрановой балки	37
2. 2. Алгоритм расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке	50
2. 3. Решение бифуркационной задачи устойчивости стенки с трещиной	54
2. 3. 1. Устойчивость при чистом изгибе	55
2. 3. 2. Устойчивость при чистом сдвиге	58
2. 3. 3. Устойчивость при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы	60
2. 4. Результаты решения деформационной задачи устойчивости стенки.....	63
2. 5. Учет влияния трещин на снижение расчетных критических напряжений стенки	70

2. 6. Выводы по второй главе	73
------------------------------------	----

ГЛАВА 3. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В СТЕНКЕ

3. 1. Влияние трещин на несущую способность подкрановых балок.....	74
3. 1. 1. Несущая способность сжатого пояса при чистом изгибе	76
3. 1. 2. Несущая способность стенки при чистом сдвиге	82
3. 1. 3. Влияние трещин на изменение напряженно-деформированного состояния подкрановых балок при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы	84
3. 2. Инженерная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке	86
3. 3. Методика определения предельной длины трещины.....	94
3. 4. Рекомендации по временной эксплуатации подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке	97
3. 5. Выводы по третьей главе.....	101

ГЛАВА 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ДАННЫМИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.....

4. 1. Экспериментальные исследования эксплуатируемых подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке	103
4. 1. 1. Цель и задача эксперимента.....	103
4. 1. 2. Объект экспериментального исследования.....	105
4. 1. 3. Натурные испытания подкрановой балки с усталостной трещиной .	108
4. 1. 4. Анализ данных мониторинга	112
4. 2. Натурные испытания подкрановых балок с трещинами А. А. Железнова и И. И. Крылова	130
4. 2. 1. Описание и методика проведения испытаний	130
4. 2. 2. Сравнительный анализ теоретических результатов с данными натурального эксперимента	135
4. 3. Выводы по четвертой главе	138

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	143
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. На металлургических комбинатах и других действующих производствах с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы подкрановые балки эксплуатируются с повреждениями, значительную часть которых (90-95% от общего количества) составляют усталостные трещины в стенке, которые могут возникнуть в течение 2–5 лет после ввода конструкций в эксплуатацию. По действующим нормам и требованиям Ростехнадзора, эксплуатация стальных подкрановых балок с трещинами не допускается. Выполнение данного требования и вывод поврежденных подкрановых балок из эксплуатации приводит к значительным экономическим потерям, связанным с их заменой и остановкой производства. Однако, опыт обследований эксплуатируемых подкрановых балок показал, что во многих случаях они имеют запасы несущей способности, которые при начальном развитии трещин позволяют временно эксплуатировать поврежденные балки до ремонта или замены.

Решение о возможности временной эксплуатации подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке может быть принято на основе соответствующего нормативно-технического документа. В настоящее время создание и повсеместное применение такого руководящего документа сдерживается отсутствием достоверных результатов исследования влияния усталостных трещин в стенке на напряженно-деформированные и предельные состояния подкрановых балок.

Таким образом, исследование влияния усталостных трещин на несущую способность подкрановых балок в настоящее время является весьма актуальной задачей, решение которой позволит обосновать возможность временной эксплуатации поврежденных конструкций.

Степень разработанности темы исследования. Вопрос низкой долговечности и усталостной прочности подкрановых балок изучен достаточно подробно. Существенный вклад в его решение был заложен еще в прошлом веке

такими учеными, как Беленя Е.И., Бабкин В.И., Валь В.Н., Васюта Б.Н., Горпинченко В.М., Кикин В.И., Крылов И.И., Кудишин Ю.И., Нежданов К.К., Патрикеев А.Б., Сабуров В.Ф., Уваров Б.Ю и др. За последние десятилетия ими были предложены различные варианты повышения долговечности подкрановых балок, связанные, в т. ч. с разработкой конструктивных мероприятий, тормозящих появление и развитие усталостных трещин и новых конструктивных решений подкрановых конструкций. Среди отечественных авторов, которые активно занимались вопросами совершенствования конструктивных форм подкрановых балок и изучением их долговечности, следует выделить Нежданова К.К., Чумакова В.А., Кузьмишкина А.А., Попченкова И.В., Карева М.А., Сабурова В.Ф., Ли М.Л., Чалкова Г.В., Новоселова А.А. и др. Ими были предложены различные варианты повышения долговечности подкрановых балок, разработаны новые конструктивные формы подкрановых балок, эффективность которых была подтверждена натурными экспериментами. Некоторые новые типы подкрановых конструкций прошли апробацию на реальных производствах.

Среди иностранных исследователей усталостной прочности подкрановых конструкций посвящены работы G. Ávila, E. Palma, R. De Paula, Ozden Caglayan, Kadir Ozakgul, Ovunc Tezer, Erdogan Uzgider, J. T. P. Castro, J. L. F. Freire, R. D. Vieira, Mathias Euler, Colin Taylor и др. Эти работы были посвящены анализу изменения уровня максимальных напряжений в сечении балки в зависимости от числа циклов при разных режимах нагружений во времени, изучению усталостной прочности подкрановых балок, а также созданию методик по определению количества циклов нагружения балок до достижения ею предельного состояния.

Вопросами технического обследования, мониторинга эксплуатируемых стальных подкрановых балок, в т. ч. с усталостными трещинами, и их экспериментальными исследованиями в разное время занимались Белый Г.И., Крылов И. И., Нежданов К.К., Чумаков В.А., Васюта Б.Н., Спирин Г.М., Зензинов В. Н., Кандаков Г. П., Конаков А. И., Липатов А. С., Сабуров В. Ф., Тиков А.В., Щербаков Е. А., Евдокимова Э. В. и др. По результатам проведенных исследований с учетом многолетнего практического опыта обследований ими было разработано

«Руководство по оценке технического состояния стальных подкрановых конструкций».

Работа подкрановых балок с трещинами и оценка возможности их временной эксплуатации исследовалась Крыловым И.И., Васютой Б.Н., Железновым А.А., Складневым А.И., Сабуровым В.Ф., Горицким В.М., Крыловым Н.А., Спириным Г.М., Чалковым Г.В., Москвичевым В.В., Тиковой А.В., Артюховой В.Н., Васяткиной Г.И., Меньшиковой А.В., Касаткиной В.Б., Чабан Е.А. и др. Большинство отмеченных исследований можно разделить на три группы. В первой группе исследований оценку работоспособности подкрановых балок предлагается давать при помощи вероятностных расчетов. Идея данного подхода состоит в определении эксплуатационной надежности подкрановых балок при помощи вероятностного расчета их несущей способности на основе большого количества исходных данных (свойств материалов, нагрузки, наличия и характеристик дефектов и пр.). Остаточный ресурс балок определяется временем эксплуатации до достижения функцией эксплуатационной надежности предельного значения. Вторая группа исследований направлена на определение остаточного ресурса поврежденных подкрановых балок на базе критериев механики разрушений. Основываясь на выявленных кинетических зависимостях и уравнениях предельных состояний находятся значения коэффициентов интенсивности напряжений в вершинах трещин, по зависимостям $\langle l_{тр} - N \rangle$, $\langle K_{ief} - N \rangle$ определяется либо предельная длина трещины, либо количество циклов нагружения балок до потери ими несущей способности. Третья группа исследований направлена на определение качественного и количественного влияния трещин на работу подкрановых балок, оценка временной эксплуатационной пригодности балки дается на основе их фактических напряженно-деформированных состояний.

Следует отметить, что в имеющихся нормативно-технических документах, допускающих временную эксплуатацию подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, как правило, предлагаются методики оценки эксплуатационной пригодности, построенные на вероятностной основе или разработанные на базе критериев механики разрушения. Высокая трудоемкость

при определении исходных данных для расчета и сложность применяемого вычислительного аппарата в заложенных методиках, которые к тому же отличаются от традиционных подходов к расчетам по отечественным нормам проектирования, побуждают развивать альтернативные методы расчета, понятные для рядового инженера и наиболее полно учитывающих специфику работы поврежденных подкрановых балок.

В настоящей диссертации на основе метода численного моделирования напряженно-деформированных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке предлагается инженерная методика расчета их несущей способности, построенная в соответствии с действующими отечественными нормами проектирования.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – разработка метода исследования напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке для обоснования возможности их временной эксплуатации до ремонта или замены.

Задачи исследования:

1. Разработать численную модель и метод расчета подкрановых балок с горизонтальными усталостными трещинами в стенке, позволяющих определить их напряженно-деформированные состояния с учетом геометрических несовершенств.
2. Провести исследования местной устойчивости стенки подкрановых балок с трещинами при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы.
3. Выявить качественные и количественные зависимости влияния трещин на напряженно-деформированные состояния подкрановых балок в зависимости от гибкости стенки и параметров трещины (длины и ее положения в отсеке).
4. Исследовать влияние трещин на напряженно-деформированные и предельные состояния сжатых поясов с учетом их геометрических несовершенств и условий закрепления.

5. Разработать методику определения несущей способности подкрановых балок с трещинами при действии изгибающего момента и поперечной силы с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса.

6. Разработать инженерную методику расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

7. Разработать методику определения предельной длины трещины и рекомендации по временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок до ремонта или замены.

8. Провести верификацию достоверности полученных результатов путем сравнения их с материалами мониторинга подкрановых балок с трещинами, эксплуатируемых на действующем производстве, а также с данными натурных испытаний.

Объект исследования: подкрановые балки с кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы с горизонтальными усталостными трещинами в стенке в зоне сжатого пояса.

Предмет исследования: напряженно-деформированные и предельные состояния подкрановых балок, поврежденных усталостными трещинами.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Область исследования соответствует требованиям Паспорта научной специальности ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, пункт 1 «Построение и развитие теории, аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений».

Научная новизна исследования заключается в:

1. Разработке метода расчета стальных подкрановых балок с горизонтальными усталостными трещинами в стенке с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса.

2. Установлении зависимостей критических параметров устойчивости стенок подкрановых балок от длины и положения трещины при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы.

3. Определении напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок в зависимости от гибкости стенки и параметров трещины с учетом геометрических несовершенств.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов расчета стальных балок, заключающемся в определении напряженно-деформированных и предельных состояний эксплуатируемых подкрановых балок, имеющих усталостные трещины в стенке и геометрические несовершенства.

Практическая значимость работы заключается в разработке инженерной методики расчета поврежденных подкрановых балок для обоснования возможности их временной эксплуатации до ремонта или замены и определения предельной длины трещины.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке нормативно-технической или справочной литературы по временной эксплуатации подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке под сжатым поясом.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются общенаучные методы познания, в частности анализ и сравнение полученных теоретически результатов с данными натурных экспериментов, положения теории устойчивости тонких пластин и теории изгиба балок, метод численного моделирования с применением конечно-элементных расчетных комплексов.

Положения, выносимые на защиту:

- численная модель и метод расчета подкрановых балок с горизонтальными усталостными трещинами в стенке, позволяющих определить их напряженно-деформированные и предельные состояния с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса;
- результаты исследования устойчивости поврежденной стенки подкрановой балки при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы;

- результаты исследования влияния трещин на изменение напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса;
- инженерная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке;
- сравнение результатов исследований по разработанному методу с материалами мониторинга подкрановых балок с трещинами, эксплуатируемых на действующем производстве, и данными натурных экспериментов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- использованием гипотез и допущений технической теории устойчивости тонких пластин и технической теории изгиба балок;
- сравнением результатов решения бифуркационных и деформационных задач устойчивости неповрежденных стенок подкрановых балок, полученных при помощи метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS, с расчетами по действующим отечественным нормам;
- верификацией полученных результатов с данными натурных испытаний и материалами мониторинга подкрановых балок с трещинами, эксплуатируемых на действующем производстве.

Личный вклад автора диссертации. Все результаты диссертационной работы получены лично автором. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежит постановка задач и формулировка основных положений, определяющих научную новизну исследований.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях:

- 72-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 3-5 апреля 2019 г.;

- 75-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 19-20 ноября 2019 г.;
- 73-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 8-10 апреля 2020 г.;
- 74-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 5-9 апреля 2021 г.;
- Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Технология и организация строительного производства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 29 апреля 2021 г.;
- Международная научно-практическая конференция «Строительные конструкции, здания и сооружения. От науки до инноваций», посвященная 90-летию кафедр железобетонных и каменных конструкций, конструкций из дерева и пластмасс, металлических конструкций и испытания сооружений, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10-11 июня 2021 г.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 5 печатных работах общим объемом 4,07 п.л., лично автором – 2,91 п.л., в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований в практической области подтверждаются справкой о внедрении в практическую работу ООО «НИПИ «ЭРКОН» (г. Санкт-Петербург).

Теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, используются кафедрой металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению «Строительство», специалистов по специальности «Строительство

уникальных зданий и сооружений», а также при выполнении магистерских диссертаций по направлению «Строительство».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы – 165 страниц машинописного текста, включая 42 таблицы, 81 рисунок и 49 формул. Список литературы содержит 140 наименования, в том числе 23 – на иностранных языках.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В СТЕНКЕ

1. 1. Общие сведения об эксплуатации подкрановых балок с трещинами в стенке

В настоящее время на металлургических комбинатах и других производствах с мостовыми кранами тяжелого или весьма тяжелого режима работы, в подкрановых балках после относительно небольшого срока эксплуатации (от 2 до 5 лет) появляются первые повреждения [1, 2, 5, 33, 35, 39, 94, 98, 113]. Приведем характерные дефекты и повреждения подкрановых балок, встречающиеся в период эксплуатации конструкций (см. Рисунок 1.1):

- отклонения фактических геометрических размеров элементов от проектных;
- смещение стенки относительно оси полок (эксцентриситет стенки относительно оси балки);
- погиби сжатого пояса (поз. 1);
- местные выпучивания сжатой части стенки (поз. 2);
- **усталостные трещины в подкрановых балках** (поз. 3);
- трещины в швах крепления ребер жесткости к стенке и поясам балок (поз. 4);
- коррозия поясов и стенки;
- трещины в швах крепления тормозных конструкций;
- повреждения конструкций крепления кранового рельса;
- смещения рельсов с оси балок (эксцентриситет рельса) и пр.

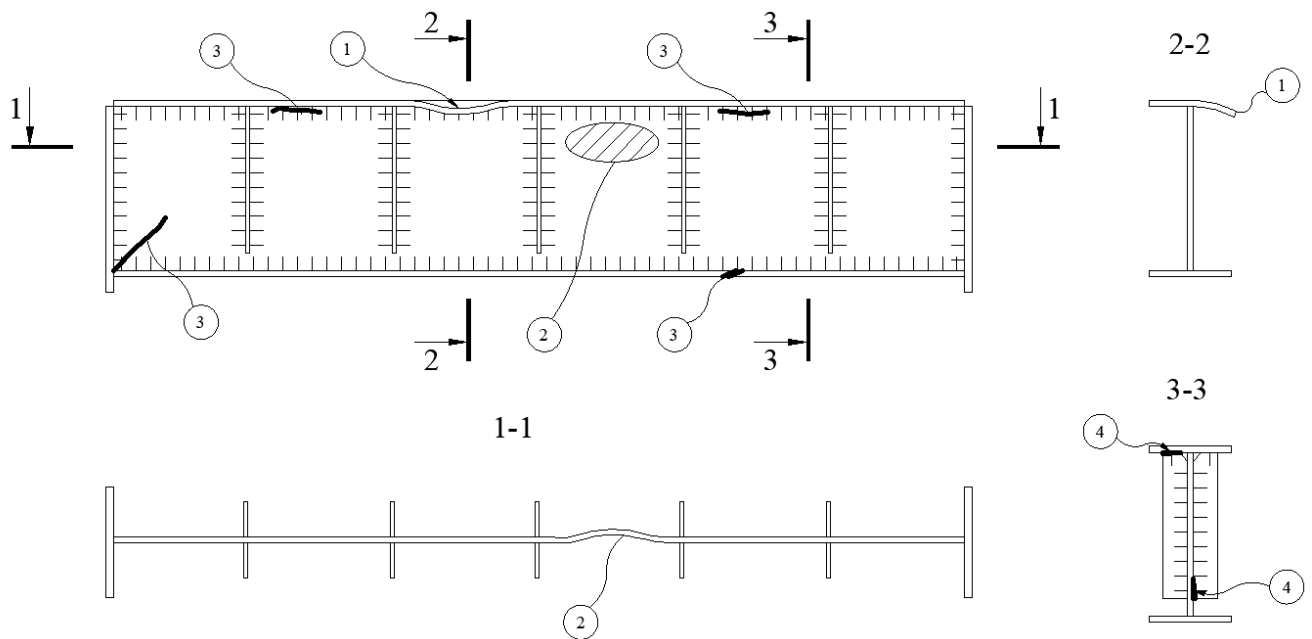


Рисунок 1.1. Схема дефектов и повреждений сварных подкрановых балок.

Наиболее распространенными повреждениями подкрановых балок являются усталостные трещины [5, 35, 80, 81]. По месту возникновения и развития их можно разделить на следующие группы (см. Рисунок 1.2):

- группа 1: трещины в растянутом поясе;
- группа 2: трещины в сжатом поясе;
- **группа 3: трещины в стенке у сжатого пояса (90-95% от общего количества повреждений [34, 81-82]);**
- группа 4: трещины в зоне стенки у растянутого пояса;
- группа 5: трещины в швах приварки ребер жесткости в сжатому поясу;
- группа 6: трещины в швах приварки опорных ребер к растянутому поясу.

С точки зрения влияния на несущую способность балки усталостные трещин, возникающих в подкрановых балках, можно разделить на два типа [56]:

1. Опасные и недопускаемые: трещины в растянутом и сжатом поясах, трещины в швах приварки опорных ребер к растянутому поясу и др.;
2. Допускаемые: **горизонтальные трещины в стенке в зоне сжатого пояса**; наклонные трещины в стенке под коротким ребром жесткости; трещины в

швах крепления ребер жесткости к стенке и в швах крепления ребер жесткости к верхнему поясу.

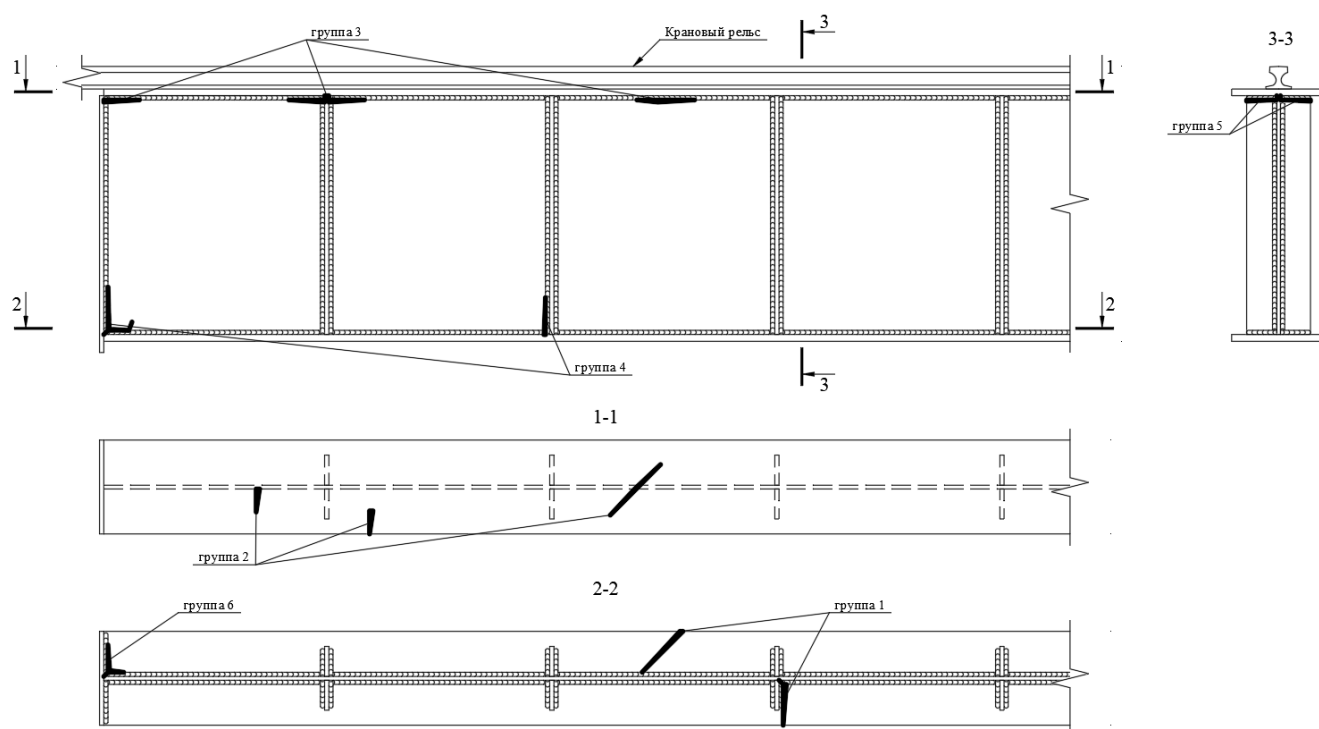


Рисунок 1.2. Группы усталостных трещин в сварных подкрановых балках по месту возникновения и развития

Горизонтальные усталостные трещины в стенке в зоне сжатого пояса можно отнести к группе допускаемых повреждений. Для обоснования возможности временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок до ремонта или замены необходимо исследовать влияние таких трещин на работу балки.

Трещины в стенке в зоне сжатого пояса по их геометрическому расположению в отсеке можно разделить на несколько типов (Рисунок 1.3а): трещины вблизи ребер жесткости; трещины внутри отсека балок; трещины над ребром жесткости [114]. По расположению относительно поясного шва (Рисунок 1.3б): трещины по сварному шву и под сварным швом [97].

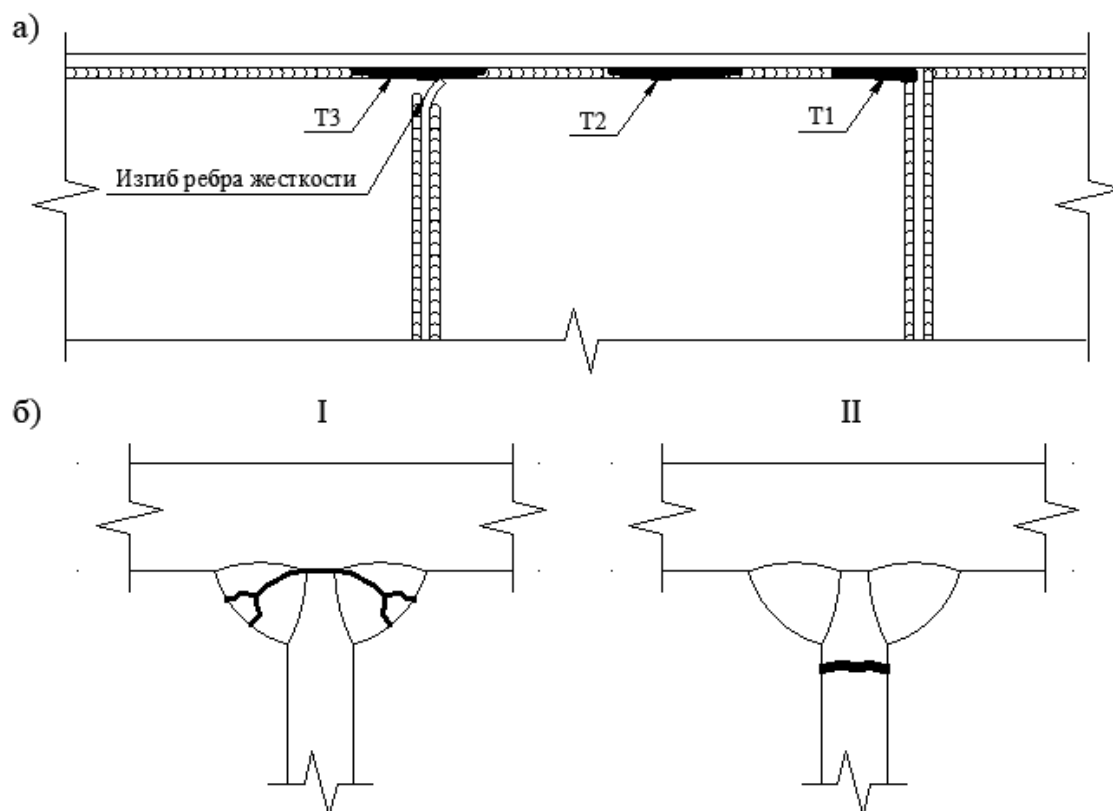


Рисунок 1.3. Классификация расположения усталостных трещин в зоне сжатого пояса:
а) относительно отсека; б) относительно поясного шва.

Фотофиксации трещин в стенках сварных эксплуатируемых подкрановых балках у сжатого пояса представлены в Таблицах 1.1 – 1.4.

Таблица 1.1. Фотофиксация дефектов подкрановых балок
в виде усталостных трещин (начало)

Фотофиксация дефекта	Описание дефекта
	Горизонтальная трещина длиной $l = 220$ мм в верхней части стенки балки, проходящая через ребро жесткости в двух соседних отсеках
	Трещина в пояском сварном шве стенки длиной $l = 80$ мм, приходящая из соседнего усиленного отсека

Таблица 1.2. Фотофиксация дефектов подкрановых балок
в виде усталостных трещин (продолжение)

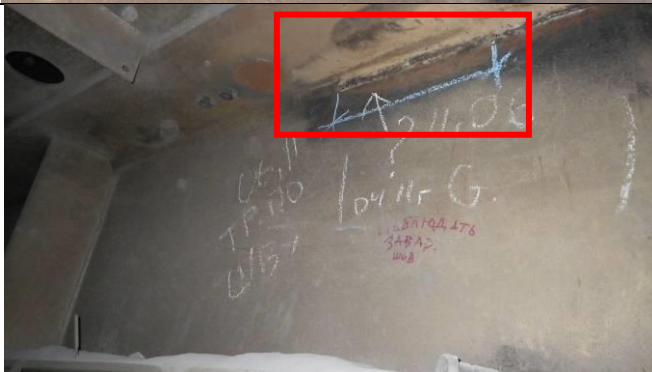
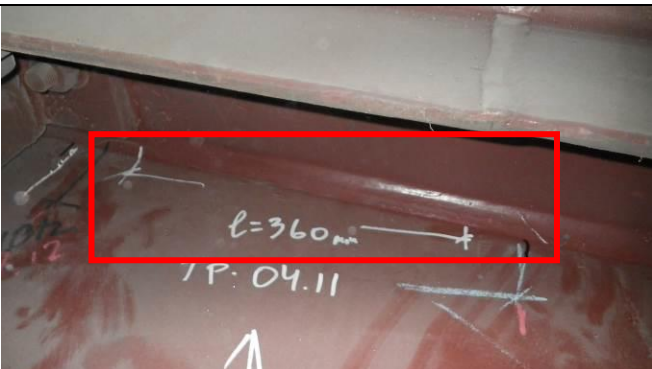
Фотофиксация дефекта	Описание дефекта
	Горизонтальная трещина длиной $l = 390$ мм в верхней части стенки подкрановой балки по поясному шву
	Горизонтальная трещина длиной $l = 380$ мм по сварному шву в стыке стенки и верхнего пояса подкрановой балки. Трещина появилась повторно после заварки предыдущей
	Горизонтальная трещина длиной $l = 500$ мм в верхней части стенки у ребра жесткости. Трещина была рассверлена и заварена, но спустя время проявилась снова
	Горизонтальная трещина длиной $l = 240$ мм по поясному сварному шву подкрановой балки

Таблица 1.3. Фотофиксация дефектов подкрановых балок
в виде усталостных трещин (окончание)

	Горизонтальная трещина $l = 515$ мм по сварному шву в стыке стенки и верхнего пояса подкрановой балки
---	---

Трещины в стенке в зоне сжатого пояса могут возникнуть из-за целого ряда причин [11, 55, 73, 97, 107, 112-113], перечислим наиболее распространенные из них:

- микродефекты в сварном шве (поры, расслоения) между стенкой и полкой, которые после относительно небольшого срока эксплуатации развиваются в микротрещины, а затем в трещины значительной длины;
- концентраторы напряжений в местах крепления конструктивных элементов к полкам (стенка, ребра жесткости и пр.);
- несовершенства геометрии элементов балок;
- перекосы кранов;
- расшатывание и повреждения креплений рельсов к подкрановым балкам;
- значительные эксцентриситеты рельсов и др.

Совокупное влияние указанных факторов при длительной эксплуатации приводит к значительному увеличению числа подкрановых балок с усталостными трещинами. Массовость трещин, расстройство соединений и узлов, неэффективные усиления зачастую приводят к нарушению нормальной эксплуатации конструкций и остановке производства.

Из опыта обследований известно, что подкрановые балки имеют резервы несущей способности [8, 38], и в последние десятилетия предпринимались попытки обоснования возможности их временной эксплуатации с трещинами. В разное время были разработаны руководства, рекомендации и методические

указания [89, 91, 92, 105, 106, 117], допускающие ограниченную временную эксплуатацию подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, однако, они могут применяться в добровольном порядке. При этом заметим, что в указаниях [106] длина трещины жестко ограничена ($[l_{тр}] = 300$ мм) и не зависит от основных размерных параметров балки (длина балки, ширина отсека и пр.).

1. 2. Анализ исследований оценки эксплуатационной пригодности подкрановых балок с трещинами

Анализ исследований, посвященных изучению работы подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, позволяет укрупненно выделить следующие группы подходов к оценке их эксплуатационной пригодности:

1. Вероятностный подход. По результатам исследования широкого спектра балок с различными повреждениями строятся регрессионные зависимости несущей способности подкрановых балок от контролируемых параметров дефектов и самих балок во времени, по которым дается оценка ее остаточного ресурса;

2. Определение остаточного ресурса подкрановой балки с использованием критериев механики разрушения. При данном подходе сроки временной эксплуатации поврежденных балок в общем виде определяются по характерным зависимостям: «длина трещины – коэффициент интенсивности напряжений (КИН) – число циклов нагружения», задававшись эффективным коэффициентом интенсивности напряжений определяется либо предельная длина трещины, либо количество циклов нагружения балки до потери балкой несущей способности;

3. Оценка эксплуатационной пригодности подкрановых балок с усталостными трещинами на основе их фактического напряженно-деформированного состояния. Исходя из выявленных качественных и количественных зависимостей снижения несущей способности подкрановых балок обосновывается возможность их временной эксплуатации до ремонта или замены.

Заметим, что первые две группы исследований направлены на определение остаточного ресурса подкрановых балок с трещинами в виде интервала времени или числа циклов нагружения, в пределах которых не возникает отказа конструкции. Третья группа исследований направлена на развитие методов оценки снижения несущей способности дефектных балок в определенный момент наблюдения, фактический временной ресурс определяется по результатам мониторинга за дефектными балками до достижения трещины предельной длины (см. Рисунок 1.4).

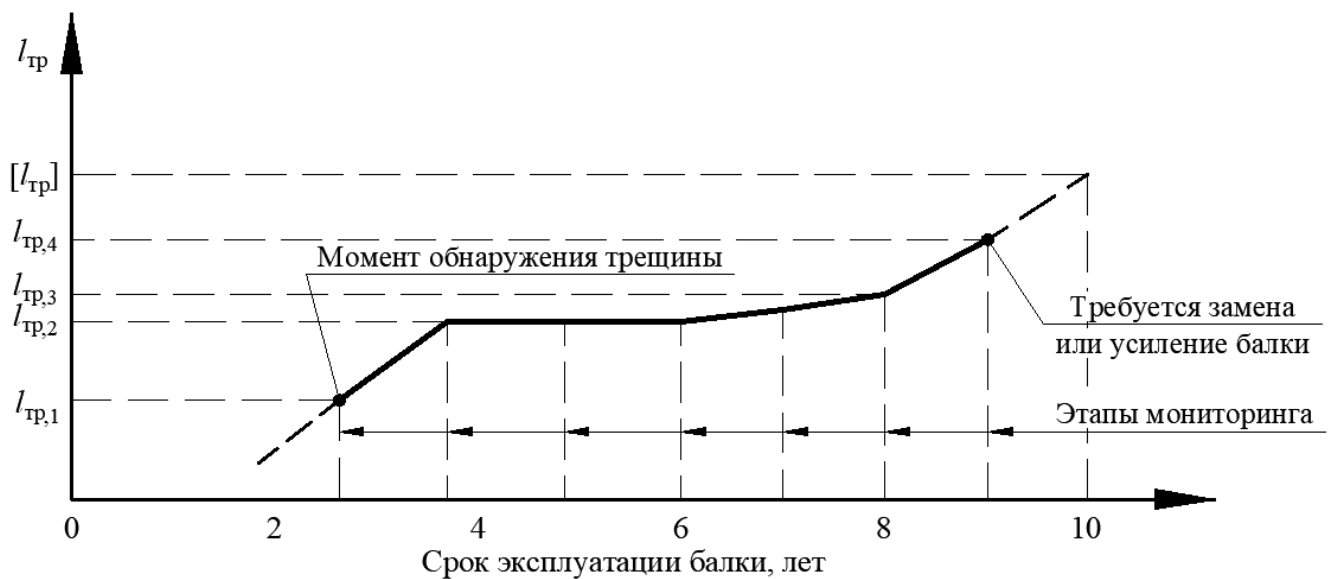


Рисунок 1.4. Пример изменения трещины в стенке во времени ($[l_{тр}]$ – предельная длина трещины)

1. 2. 1. Вероятностный подход к оценке остаточного ресурса подкрановой балки с трещинами

Определение остаточного ресурса подкрановых балок с применением вероятностного подхода рассмотрено в работах Сабурова В. Ф. [93], Еремина К. И. [32], Туманова В. А. [73], Сердюка В. В. [95], Забродина М. П., Веселова В. В. [22], Кима И. В. [40], Кунина Ю. С. [62] и др. Ими приведен анализ дефектов и повреждений широкого спектра подкрановых балок, разработан и реализован алгоритм расчета статической и эксплуатационной надежности сварных подкрановых балок в зависимости от основных параметров несущей способности подкрановых балок. Суть алгоритма состоит в определении момента

времени (остаточного числа циклов нагружения), при котором основной статистический показатель эксплуатационной надежности становится ниже принятого предельно допускаемого значения [108]. Численное значение этого показателя вычисляется по определенным статистическим зависимостям, связанным с контролируемыми параметрами балок. На Рисунок 1.5 приведен пример снижения эксплуатационной надежности балок от срока эксплуатации балок при различных заложенных резервах выносливости из работы [22].

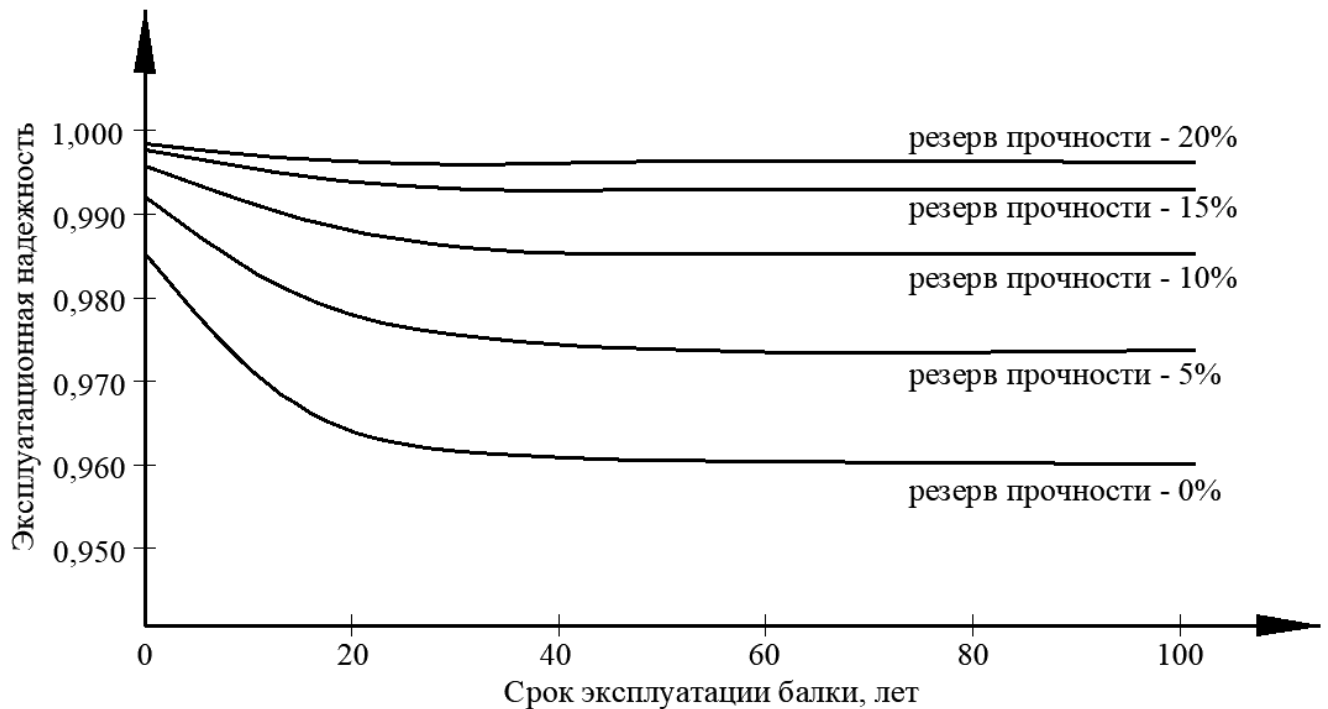


Рисунок 1.5. Снижение эксплуатационной надежности подкрановых балок с мостовыми кранами среднего режима работы по нормальным напряжениям сжатого пояса

В работе [40] был разработан и реализован алгоритм расчета оценки долговечности поврежденных подкрановых балок в условиях недостаточности информации о режимах нагружения, свойствах материалов и пр. При реализации алгоритма, для определения предельных состояний поврежденной и построения модели долговечности поврежденных подкрановых балок применялось нейросетевое моделирование. Модель долговечности строилась в зависимостях «коэффициент интенсивности напряжений (КИН) – число циклов нагружения». Зависимости строились для подкрановых балок при различных длинах трещин и других контролируемых параметрах. Краткий алгоритм комплексной оценки



Рисунок 1.6. Алгоритм расчета долговечности поврежденных подкрановых балок.

долговечности из упомянутого исследования показан на блок-схеме Рисунка 1.6.

Кратко его можно сформулировать следующим образом:

- анализ и формализация исходных данных;
- выделение метода расчета долговечности с учетом имеющихся исходных данных, параметризация и обучение нейронной сети;
- на основе обученной нейронной сети вычисление комплексной оценки долговечности подкрановой балки;

- анализ результатов нейросетевой модели статистическими инструментами и расчет итоговой достоверности полученных данных;
- определение временного эксплуатационного ресурса работы подкрановой балки.

Среди достоинств рассматриваемого метода следует отметить индивидуальный подход к рассматриваемым конструкциям. При применении данного метода с высокой долей вероятности определяется «слабое» место конструкции и даются подробные рекомендации по дальнейшей эксплуатации поврежденных балок. К недостаткам данного метода можно отнести высокую трудоемкость при формировании исходных данных для построения статистических зависимостей. Многие исходные параметры в статистических моделях требуется определять экспериментальным способом, и, как правило, они индивидуальны для каждого конкретного случая подкрановой конструкции.

1. 2. 2. Оценка остаточного ресурса подкрановой балки с применением критериев на базе механики разрушения

Вопрос оценки остаточного ресурса подкрановых балок, основанного на критериях механики разрушения изучен достаточно подробно. Крупный вклад в проработку вопроса внесли Крылов Н. А., Спирин Г. М. [104], Крылов И. И. [14, 17, 41-54], Васюта Б. Н. [17-21], Бабкин В. И. [63, 64], Складнев А. И. [63, 97, 98], Сердюк В. В. [95, 98], Москвичев В. В. [68-71], Чабан Е. А. [35, 114] и др. Общий алгоритм оценки остаточного ресурса поврежденной подкрановой балки с применением критериев на базе механики разрушения можно представить в следующем виде (блок-схему см. на Рисунке 1.7):

- техническое обследование исследуемых подкрановых конструкций с выявлением дефектов в подкрановых балках;
- определение коэффициента интенсивности напряжений по выявленному техническому состоянию балки;



Рисунок 1.7. Алгоритм расчета остаточного ресурса подкрановых балок с применением критериев на базе механики разрушения

- оценка остаточного ресурса поврежденной подкрановой балки при помощи соответствующих зависимостей вида «длина трещины – КИН – число циклов нагружения».

В руководствах [105, 106] предлагается методика оценки остаточного ресурса подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса, основанная на критериях механики разрушения, при этом предельно допускаемая длина трещины в них ограничена абсолютной величиной $[l_{тр}] = 300$ мм и не зависит от высоты балки, ее несущей способности, нагрузки и длины отсека, что, очевидно, не учитывает резервы, которые они могут иметь. Предельная длина трещины должна быть относительной величиной, учитывающей фактический режим загрузки, геометрические параметры балки и т. д.

Приведенный подход значительно расширяет возможности стандартного анализа конструкций, по выявленным зависимостям, определяемым при помощи механики разрушения, можно оценить резервы подкрановых балок, определить предельные длины трещин, при которых возможно безаварийное продолжение их эксплуатации, оценить количество циклов до наступления предельного состояния. К недостаткам данного подхода можно отнести сложность вычислительного аппарата, необходимость дополнительных трудоемких работ при определении основных параметров искомых зависимостей. К тому же при использовании данного подхода не учитывается то, что подкрановые балки могут иметь резервы несущей способности, в том числе благодаря проведению мероприятий по их усилению или, например, после технологического ограничения грузоподъемности кранов на участках производства с поврежденными балками.

1. 2. 3. Оценка эксплуатационной пригодности на основе фактического напряженно-деформированного состояния подкрановой балки

Исследования по оценке эксплуатационной пригодности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке по фактическому напряженно-деформированному состоянию распространены не так широко, в разное время ими

занимались Крылов И. И., Железнов А. А. [34, 42, 45, 47] и др. При данном подходе оценку эксплуатационной пригодности поврежденных подкрановых балок предлагается давать на основании прочностных расчетов, скорректированных с учетом влияния трещины. Приведем основные проверки прочности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке:

- растянутого пояса по нормальным напряжениям;
- сжатого пояса по нормальным напряжениям;
- стенки по касательным напряжениям;
- стенки в сжатой части под колесом крана (местная прочность);
- стенок балок на местную устойчивость.

В 1980-х годах были разработаны рекомендации [89], в них отмечается, что наличие трещины любой длины приводит к возникновению дополнительного изгиба сжатого пояса балки, который учитывается при проверке прочности балки по нормальным и касательным напряжениям:

$$\sigma_x = \frac{M}{I_x} y + Ql \left(\frac{y_1}{I_1 + I_2} - \frac{y}{I_x} \right) \leq R_y \gamma_c; \quad (1.1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{QS_{omc}}{(I_1 + I_2)t_w} \leq R_s \gamma_c, \quad (1.2)$$

где I_x – момент инерции сечения балки без трещины относительно оси x - x ; I_1, I_2 – собственные моменты инерции соответственно верхней и нижней частей балки, разделенных трещиной (см. Рисунок 1.8); y – расстояние от нейтральной оси балки без трещины до проверяемой точки; y_1 – то же от оси x_2 - x_2 ; l – расчетная полудлина трещины; t_w – толщина стенки.

Проверку по приведенным напряжениям в стенке предлагается выполнять по формуле (33) из отечественных норм проектирования [100, 101] с нормальными и касательными напряжениями, значения которых определяется по формулам (1.1) и (1.2) с учетом замены ординаты y .

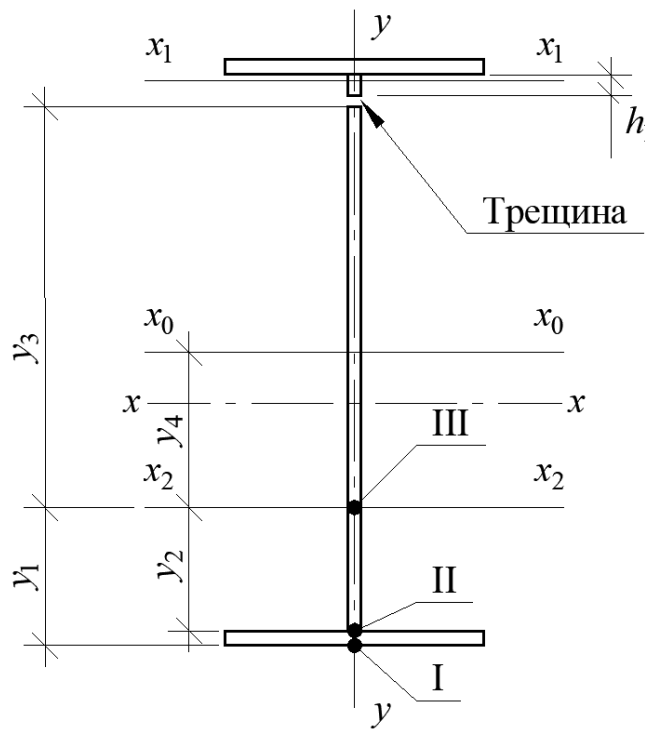


Рисунок 1.8. Расчетное сечение балки

Расчет на местную устойчивость стенки, укрепленной поперечными ребрами жесткости, предлагается выполнять по формуле (74) норм проектирования, при этом значения критических параметров напряжений определяются по формулам:

$$\sigma_{cr} = 21,6 \frac{R_y}{\lambda_w^2}; \quad (1.3)$$

$$\tau_{cr} = 8,24 \left(1,02 + \frac{0,76}{\mu^2} \right) \frac{R_y}{\lambda_w^2}; \quad (1.4)$$

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{c_1^* R_y}{\lambda_a^2}, \quad (1.5)$$

где c_1^* – коэффициент, принимаемый по табл. 5 указанных рекомендаций.

Инженерная методика, приведенная в рекомендациях, допускает временную эксплуатацию подкрановых балок с усталостными трещинами при выполнении приведенных в них проверок по прочности и местной устойчивости стенки и полки. Поправочные коэффициенты в формулах из рекомендаций имеют одинаковые значения для всех случаев балок с трещинами, во многих проверках не учитывается влияние длины трещины, ее геометрического положения (посередине отсека, вблизи ребра жесткости и пр.), влияние гибкости стенки на дополнительное

снижение критических параметров, что в совокупности может приводить к занижению или переоценке действительных резервов несущей способности поврежденных подкрановых балок.

Также следует отметить, что в упомянутых рекомендациях не учтены другие дефекты и повреждения подкрановых конструкций, в том числе геометрических несовершенства самих балок (таких как местные выпучивания стенки, местные погиби поясов и др.). Не показано их влияние на несущую способность подкрановых балок, включая прочность элементов балок (стенка, пояса) и местную устойчивость стенок. Подходы, которые применяются в обозначенных исследованиях, построены на методиках, разработанных в прошлом столетии, и не учитывают развитие современных технологий.

В настоящей работе оценку эксплуатационной пригодности подкрановых балок с трещинами предлагается определять с применением данного подхода на основе метода численного моделирования. Влияние трещины на снижение несущей способности поврежденных подкрановых балок рассматривается при ее конечных геометрических параметрах, без учета кинетики развития.

1. 3. Анализ исследований по повышению долговечности подкрановых балок

Исследованиями долговечности подкрановых балок, в т. ч. с трещинами, посвящены работы многих отечественных ученых. Большой пласт исследований был посвящен разработке новых конструктивных форм подкрановых конструкций (например, подкрановые балки коробчатого сечения, балки с гофрированной стенкой, рельсобалочные конструкции и пр.). Наиболее активно данным вопросом в последние десятилетия занимались Кудишин Ю.И. [58-60], Горпинченко В.М. [24], Нежданов К.К. [73-77], Чумаков В.А. [116], Кузьмишкин А.А. [61], Попченков И.В. [83], Карев М.А. [37], Сабуров В.Ф. [93], Ли М.Л. [66], Чалков Г.В. [115], Новоселов А.А. [78], Лаштанкин А.С. [65] и др. Основная идея исследований заключалась в разработке новых типов сечений подкрановых балок, которые

меньше подвержены повреждениям усталостными трещинами, чем классические сечения. Например, в исследовании [83] приводится новая конструктивная форма подкрановых балок, в которой рельс работает в составе сечения подкрановой балки, т. н. рельсобалочная конструкция. В таких конструкциях рельс и балка представляют собой единое замкнутое трубчатое сечение, за счет чего значительно повышается крутильная жесткость сжатого пояса. Также за счет кривизны поверхности сжатой части подкрановой балки повышаются амортизирующие свойства конструкций от динамических воздействий, концентрация напряжений в узлах минимальна. Примеры перспективных вариантов сечений подкрановых балок показаны на Рисунке 1.9.

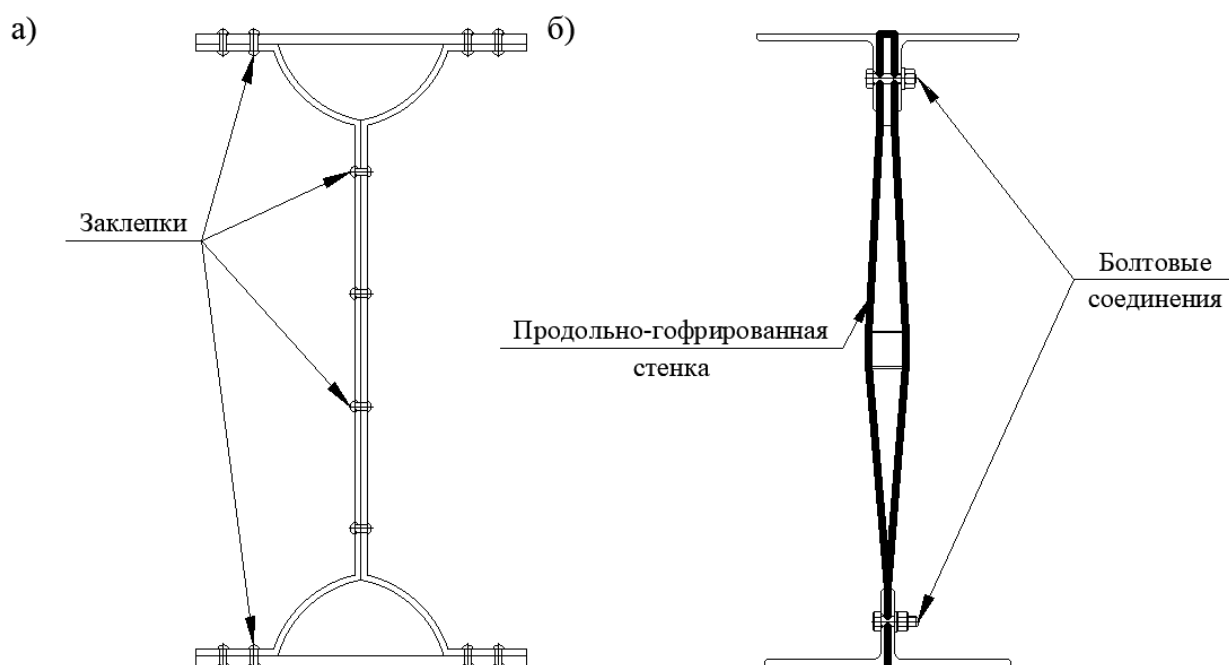


Рисунок 1.9. Варианты сечений составных подкрановых балок: а) из прокатных элементов; б) с продольно-гофрированной стенкой

Отметим, что данное направление исследований имеет развитие, скорее, в перспективе, при проектировании и строительстве новых сооружений, полная замена эксплуатируемых подкрановых конструкций в настоящее время весьма затруднительна.

Изучением циклической трещиностойкости, ресурса подкрановых балок с усталостными трещинами и их эксплуатационной пригодности в разное время занимались Бабкин В.И. [2-3], Крылов И.И. [41-42], Кикин В.И. [38-39], Складнев А.И. [97-98], Ларионов В.В. [63-64], Бирюлев В.В. [14], Васильев А.А.,

Кошутин Б.Н., Чумаков В.А. [116], и др. Результаты исследований показали, что резервы несущей способности поврежденных подкрановых балок обеспечивают их эксплуатационную пригодность до развития усталостных трещин в стенках значительной длины. Таким образом, одним из путей повышения эксплуатационной пригодности поврежденных подкрановых балок является локализация имеющихся трещин и снижение скорости их развития.

Как отмечалось, в подавляющем большинстве случаев при эксплуатации подкрановых балок не удастся избежать появления и развития трещин, и появляется необходимость в проведении мероприятий по торможению развития роста трещин. Для замедления скорости роста усталостных трещин предлагаются следующие методы [87, 89, 106]:

1. Эксплуатационно-технический. Метод заключается в целенаправленном понижении действующих нагрузок на подкрановые балки, примеры мероприятий: изменение технологической схемы работы тележки и кранов в пролете (пример ограничения показан на Рисунке 1.10); ограничение грузоподъемности кранов и др.

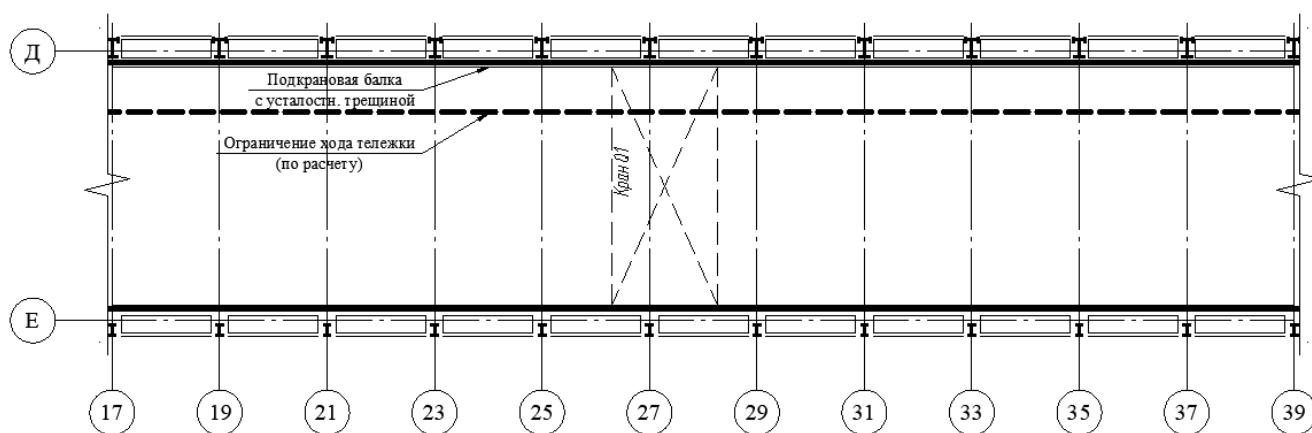


Рисунок 1.10. Торможение развития усталостных трещин в стенке при помощи ограничения работы крана

2. Технологический. При данном методе производится обработка зоны трещины с целью ликвидации трещины и/или снижения концентрации напряжений в вершинах трещины. Варианты технологических мероприятий (см. Рисунок 1.11):

- выполнение рассверловки вершин трещин с последующей установкой высокопрочных болтов с накладками;

- поверхностный наклеп стенки вблизи трещины (наиболее эффективное мероприятие [106]) и др.

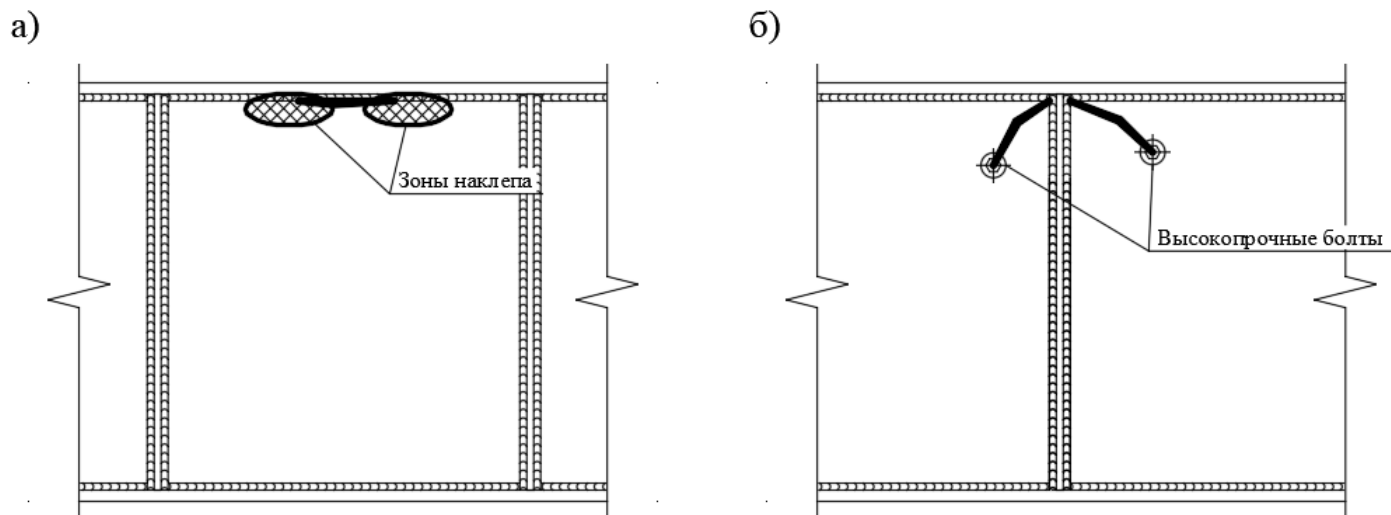


Рисунок 1.11. Технологическое торможение развития усталостных трещин в стенке: а) методом наклепа сварного шва; б) засверловкой трещины с постановкой высокопрочного болта

3. Конструктивный. Данный метод заключается во введении новых конструктивных элементов в подкрановые балки, существенно снижающих напряжения в месте трещины. Примеры конструктивных мероприятий: установка под подошву рельса амортизирующих подкладок; устройство уголковых усиливающих элементов с креплением их высокопрочными болтами к поясу и стенке (см. Рисунки 1.12 – 1.15).

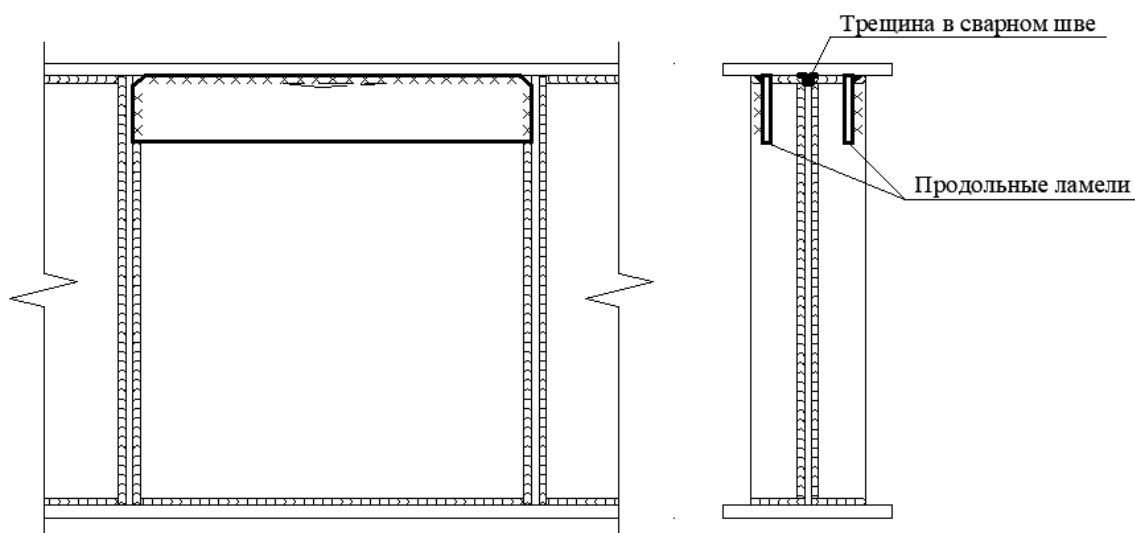


Рисунок 1.12. Конструктивное торможение развития усталостных трещин в стенке с установкой: продольных ламелей

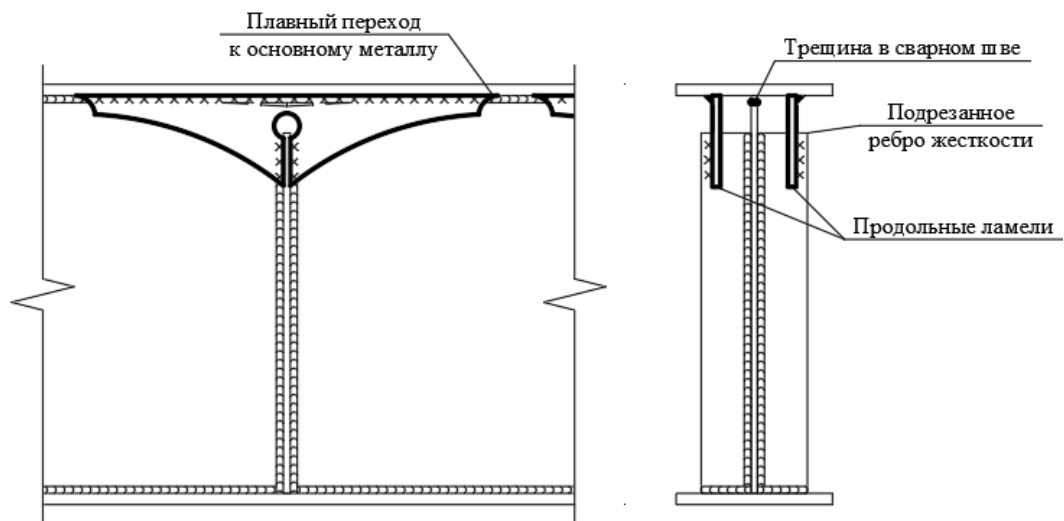


Рисунок 1.13. Конструктивное торможение развития усталостных трещин в стенке с установкой: двухконсольных продольных ламелей, в случае трещины над ребром жесткости

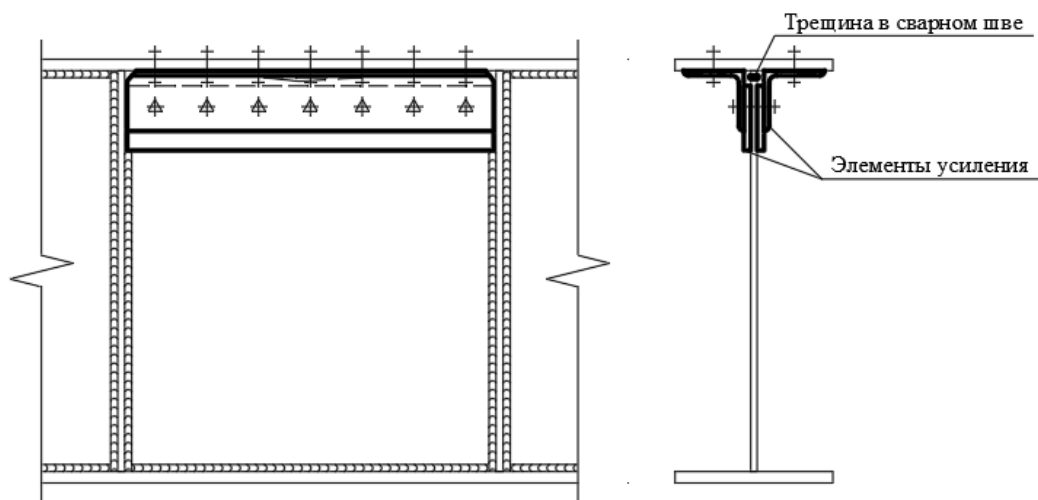


Рисунок 1.14. Конструктивное торможение развития усталостных трещин в стенке с установкой: усиливающих уголковых элементов с креплением высокопрочными болтами

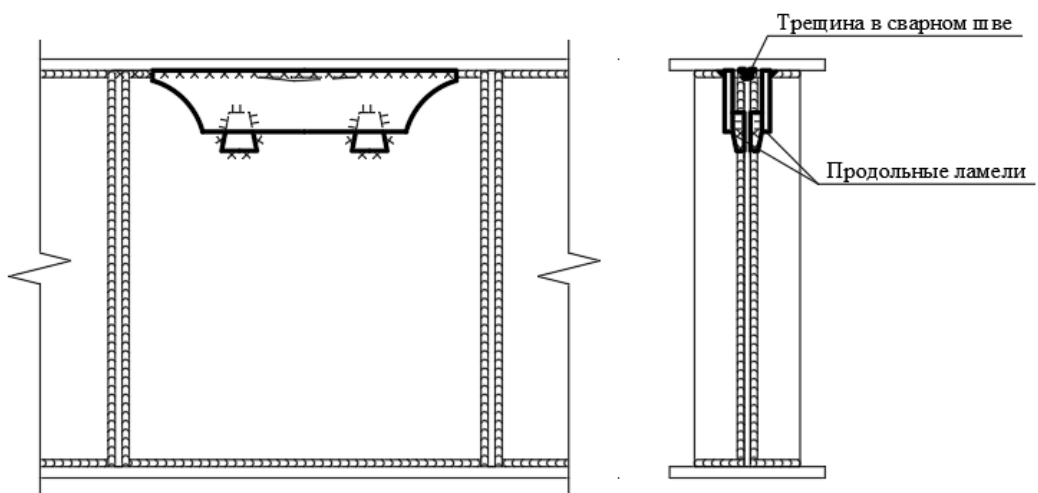


Рисунок 1.15. Конструктивное торможение развития усталостных трещин в стенке с установкой: продольных ламелей и элементов, связывающих ламели со стенкой

4. Комбинированный. Заключается в совместном использовании приведенных выше методов, благодаря чему достигается максимальный эффект.

При обосновании возможности временной эксплуатации дефектных подкрановых балок желательно предусматривать именно комбинированный метод торможения развития усталостных трещин.

Сечение стенки подкрановых балок не рекомендуется восстанавливать при помощи простой заварки трещин, т. к. дополнительное влияние остаточных напряжений приводит к еще более быстрому появлению в поврежденных зонах новых усталостных трещин. Примеры появления повторных трещин показаны в Таблице 1.1. Временная эксплуатация подкрановых балок с трещинами позволит продолжить непрерывную работу предприятий. Ремонт балок в таком случае производится по определенному порядку, в рамках плановых ремонтов участков производств.

За последние десятилетия было высказано значительное количество предложений и рекомендаций по повышению долговечности подкрановых балок, однако, в настоящее время на производствах продолжают эксплуатироваться балки, запроектированные и введенные в эксплуатацию еще в прошлом столетии. Такие балки уже значительное время эксплуатируются с трещинами, и в случае неудовлетворительного надзора за состоянием конструкций и несвоевременного устранения повреждений на таких производствах могут произойти аварии [13, 21, 97]. На Рисунках 1.16 – 1.17 показаны последствия аварий на промышленных производствах, сопровождавшихся обрушением подкрановой балки и мостового крана.

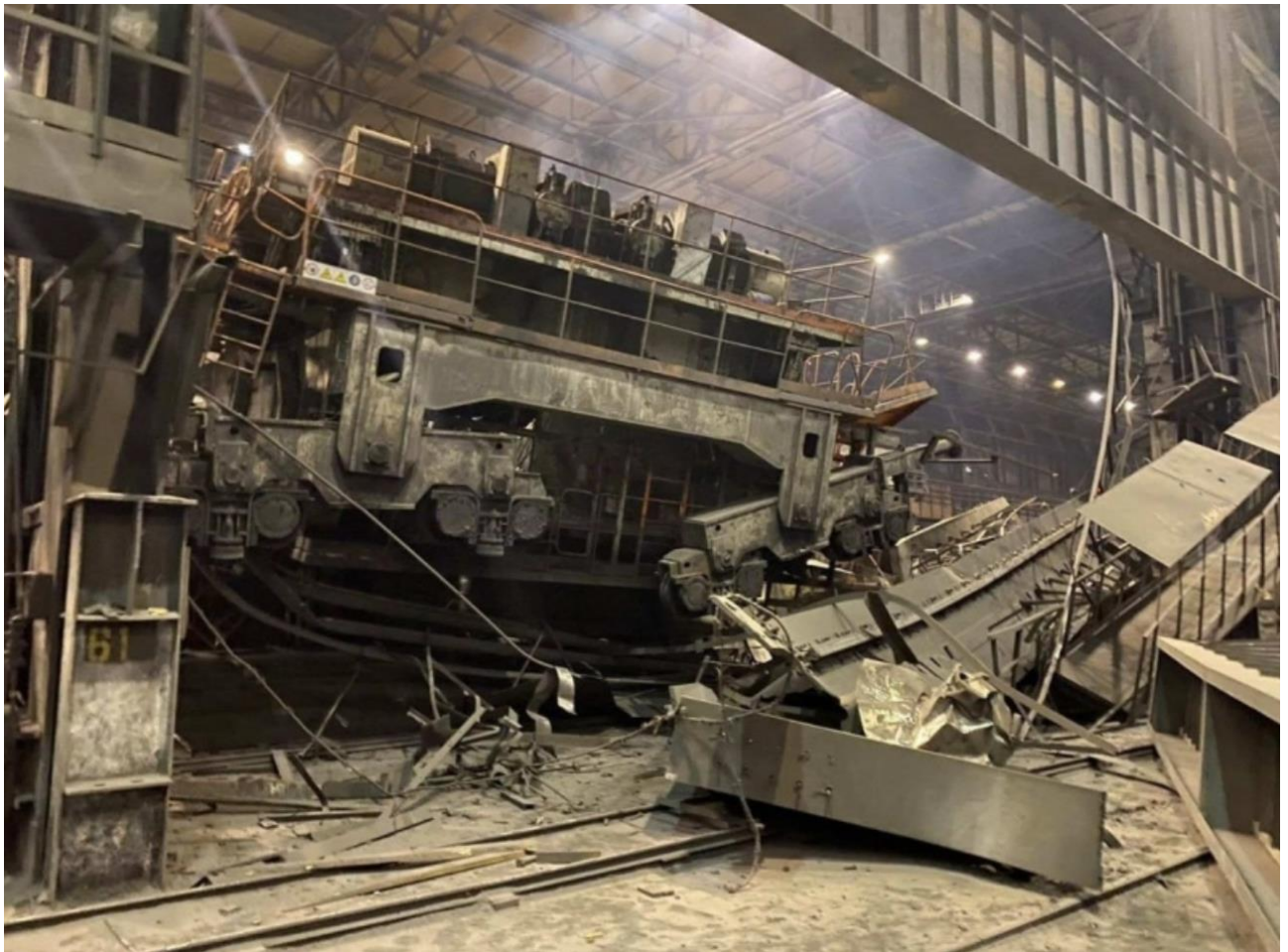


Рисунок 1.16. Последствия аварии с обрушением крана на территории конвертерного цеха Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) в 2021 г.



Рисунок 1.17. Последствия аварии в колёсо-бандажном цехе металлургического комбината Нижнего Тагила (ЕВРАЗ НТМК) в 2017 г.

1. 4. Выводы по первой главе

Проведенный анализ исследований работы подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке позволяет сделать следующие выводы:

1. Существующие рекомендательные методики оценки прочности подкрановых балок с усталостными трещинами имеют ряд существенных недостатков: не учитываются основные параметры трещин (длина и ее положение в отсеке); влияние гибкости стенки и начальных несовершенств. Имеющиеся результаты являются недостаточными для формирования достоверной методики оценки влияния трещин на напряженно-деформированное и предельное состояние поврежденных подкрановых балок.

2. В настоящее время отсутствуют исследования, в которых используются современные подходы к моделированию работы подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, имеющих геометрические несовершенства.

ГЛАВА 2. УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕНОК ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С ТРЕЩИНАМИ В ЗОНЕ СЖАТОГО ПОЯСА

В главе приводится обоснование расчетной модели подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке и предлагается алгоритм их расчета. Исследуется устойчивость поврежденных стенок, находящихся в составе подкрановых балок, при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы. При этом учитывается влияние начальных геометрических несовершенств в виде выпучиваний поврежденной стенки, которые принимаются по первым (как наихудшим) формам, вытекающим из решения соответствующих бифуркационных задач устойчивости. Результаты получены в зависимости от гибкости стенки, длины и положения трещины в отсеке.

Основываясь на полученных результатах исследования, предлагается методика учета влияния трещин на снижение расчетных критических напряжений стенки.

2. 1. Постановка задачи, гипотезы и допущения, обоснование расчетной модели подкрановой балки

Одними из наиболее распространенных повреждений подкрановых балок в зданиях и сооружениях с кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы, как уже упоминалось, являются продольные усталостные трещины в стенке по линии сварных швов или околошовной зоне у сжатого пояса (см. Рисунок 2.1а) [34, 81-82]. Основными причинами появления усталостных трещин в подкрановых балках с высокой интенсивностью эксплуатации (число циклов в год часто превышает $2 \cdot 10^6$) являются недостатки сварных соединений, сверхнормативные смещения рельса относительно оси балки, перекос мостового крана и пр. (см. Рисунок 2.1б).

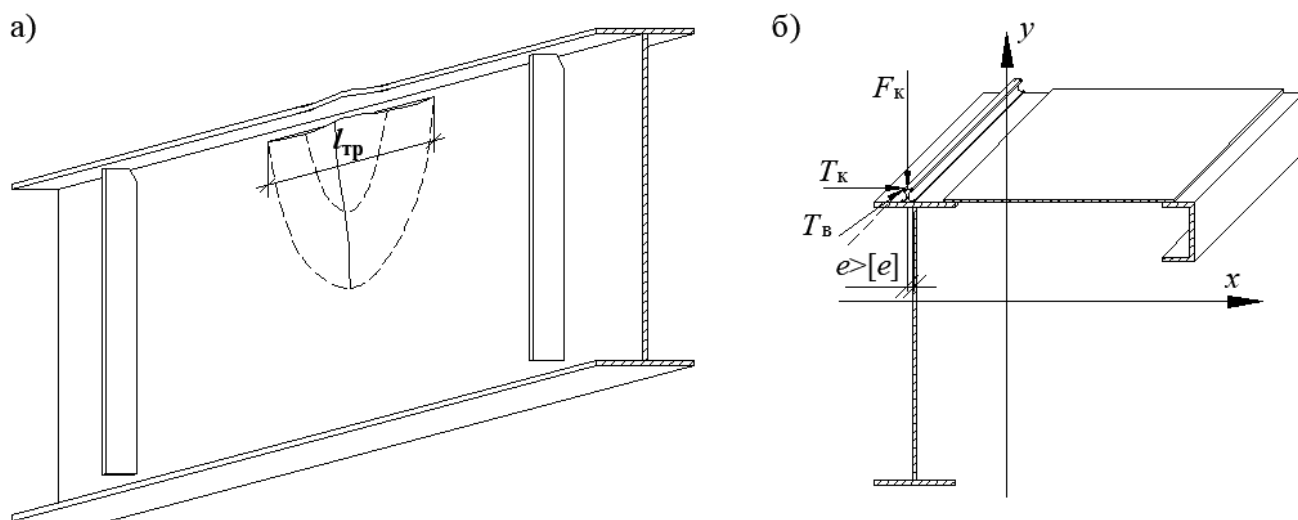


Рисунок 2.1. Схема подкрановой балки: а) фрагмент с усталостной трещиной в стенке; б) действующие нагрузки

Согласно требованиям Ростехнадзора в виде руководящего документа РД 10-138-97 [86] эксплуатация стальных подкрановых балок с трещинами — недопустима. Однако, как показала практика обследования, подкрановые балки в большинстве случаев имеют запасы несущей способности [22], поэтому для обоснования возможности их временной эксплуатации до ремонта или замены необходимо определить влияние трещин на снижение несущей способности поврежденных балок. Для этого выделим наиболее вероятные предельные состояния, которые возможны при эксплуатации конструкции с такими повреждениями и при достижении которых дальнейшая эксплуатация балок должна быть прекращена. Они могут наступить в результате:

- потери местной устойчивости стенки, ведущей к перераспределению напряжений в сечении, перегрузке сжатого пояса и к общему снижению несущей способности подкрановой балки;
- истощения несущей способности сжатого пояса;
- распространения пластических деформаций в сечении балки, ведущих к ненормативным изменениям, затрудняющим ее эксплуатацию;
- появления недопустимого прогиба балки.

Первые три типа предельных состояний относятся к I группе ПС, при достижении которых поврежденная подкрановая балка теряет способность сопротивляться внешним воздействиям или получает такие остаточные изменения,

которые не допускают возможности дальнейшей эксплуатации. Четвертый тип относится ко II группе ПС, при появлении недопустимого прогиба в подкрановой балке, сохраняющей прочность, исключается возможность ее дальнейшей эксплуатации из-за нарушения технологического режима эксплуатации кранов.

Работа подкрановых балок в условиях эксплуатации весьма сложна и существенно отличается от работы обычных балочных конструкций, что обусловлено динамичностью нагрузки и сложностью взаимодействия кранов с подкрановыми конструкциями. В отечественных нормах проектирования расчет подкрановых балок производится в квазистатической постановке, при которой динамичность действия нагрузок учитывается специальными коэффициентами [67, 99-103]. Расчет во многом аналогичен расчету обычных балок, наибольшие значения внутренних усилий определяются по линиям влияния при наиболее неблагоприятном положении кранов от сосредоточенных давлений колес кранов.

Вследствие появления и развития трещин, в поврежденной части подкрановой балки изменяется характер напряженно-деформированного состояния и возможные формы потери местной устойчивости стенки. Объем теоретических и экспериментальных исследований, как уже отмечалось, для оценки их качественного и количественного изменения – недостаточно. К тому же известно, что в элементах-пластинах балок всегда имеют место начальные геометрические несовершенства [4, 36, 72, 110], а применительно к стенкам с трещинами у сжатого пояса подкрановой балки (см. Рисунок 2.2), величина ее амплитуды выпучивания f_w может значительно превышать допускаемые по нормам проектирования [22]. Учитывая изложенное, расчет балок аналитическим методом (например, устойчивости стенок по энергетическому критерию [15, 23, 109]) представляется весьма трудоемким. Поэтому для определения напряженно-деформированного состояния и критических параметров устойчивости стенок подкрановых балок с горизонтальными усталостными трещинами в настоящей работе применяется метод численного моделирования с использованием конечно-элементного программного комплекса ANSYS [9-10, 30-31, 56-57, 90].

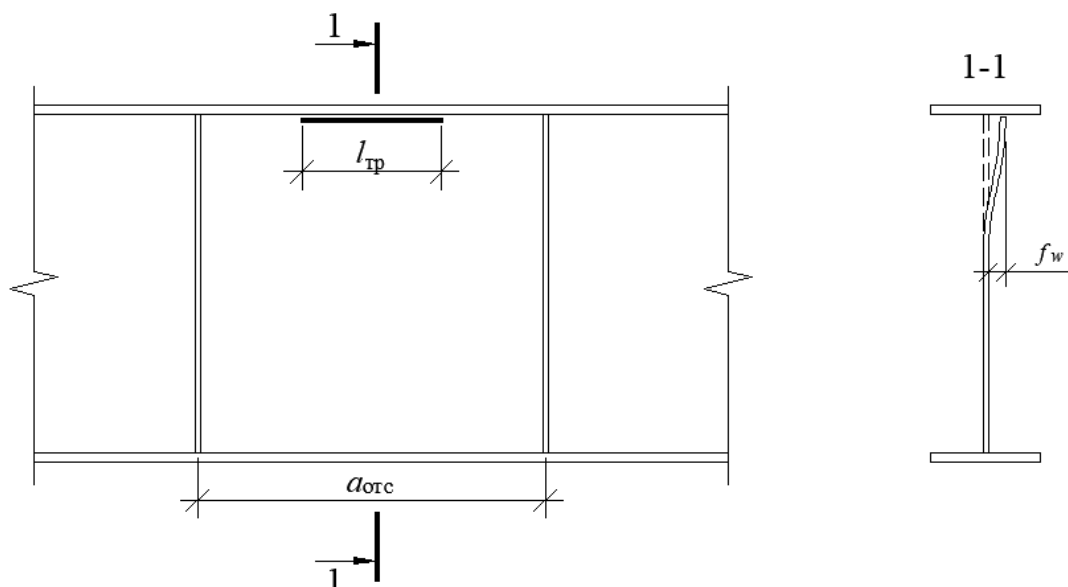


Рисунок 2.2. Схема геометрических несовершенств стенки подкрановых балок с трещинами

При использовании МКЭ в программном комплексе ANSYS формирование расчетной модели происходит по следующему порядку [6, 7, 16, 111]:

- создание модели материалов (Engineering Data);
- определение типа КЭ и жесткостных параметров, создании геометрии расчетной модели (Geometry);
- задание граничных условий (наложение связей);
- разбивка КЭ-сетки (Meshing);
- приложение нагрузки (например, Nodal Force)
- задание дополнительных параметров расчета (Setup);
- расчет (Solution);
- анализ результатов (Results);
- дополнительные расчеты (при необходимости).

Рассматривая процесс расчета подкрановых балок с горизонтальными трещинами в стенке, подробно остановимся на каждом пункте.

Материал балок принимается в виде строительной стали повышенной прочности класса С345, химический состав и другие технические требования регламентируются ГОСТ 27772 [27], при $10 < t \leq 20$ расчетное сопротивление стали изгибу по пределу текучести $R_y = 320$ МПа [101]. Сварные подкрановые балки относятся к 1-й группе конструкций, в которых напряжения не могут превышать

расчетные сопротивления стали $|\sigma| \leq R_y$ [100, 101]. Поэтому при моделировании работы материала принята упрощенная билинейная диаграмма работы стали (Рисунок 2.3), расчет ведется в упругой стадии, модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа.

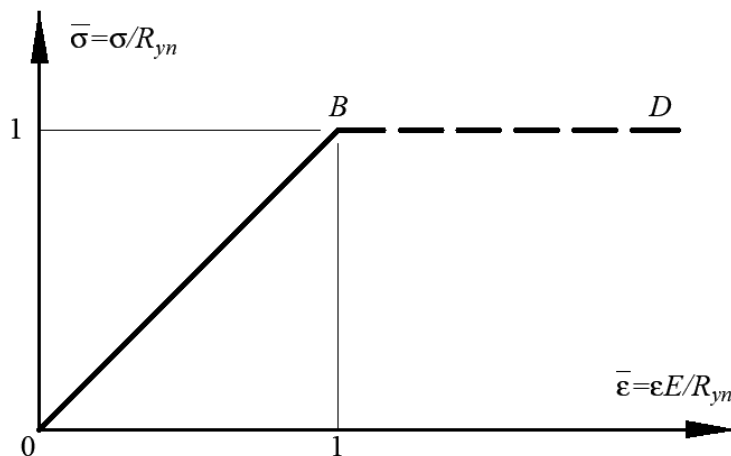


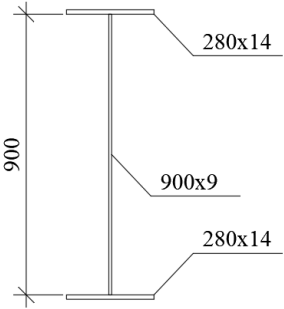
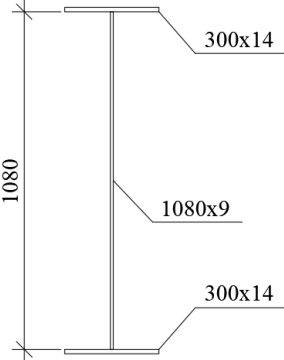
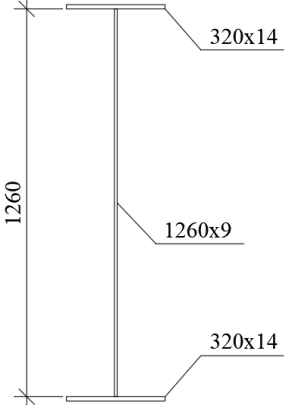
Рисунок 2.3. Обобщенная расчетная диаграмма работы стали

В общем случае типы конечных элементов условно можно разделить на одномерные (стержневые), двумерные (плоские пластинчатые, оболочечные) и трехмерные (объемные). Для определения напряженно-деформированного состояния элементов подкрановой балки и расчета устойчивости стенки в дальнейших численных исследованиях используются конечные элементы оболочечного типа (тип – SHELL281), такой тип КЭ позволяет учитывать влияние продольных и изгибных внутренних усилий. Такой выбор обоснован тем, что при использовании стержневых КЭ невозможно оценить устойчивость стенки подкрановой балки и перераспределение напряжений между поясами и стенкой в отсеках с трещиной. Использование объемных КЭ – нецелесообразно, т. к. при значительном увеличении трудоемкости обработки расчетной модели и времени вычислений, точность расчета увеличивается незначительно.

Выбор геометрических параметров сечений балок для численных исследований определялся с учетом анализа параметров типовых сварных подкрановых балок по серии [96]. Всего для расчетов было принято три типа сечений подкрановых балок с гибкостями стенки $\lambda_w = \{100; 120; 140\}$, имеющих геометрические характеристики, близкие к реальным балкам, габариты сечений

балок определялись методом экстраполяции и приведены в Таблице 2.1, сечение поперечных ребер жесткости – 90х6, шаг 1,5 м.

Таблица 2.1. Геометрические характеристики сварных подкрановых балок

Марка балки	Эскиз сечения	Размеры сечения, мм		$\lambda_w = h_w / t_w$	$\bar{\lambda}_w = \lambda_w \sqrt{R_y / E}$
		поясов	стенки		
ПБ1		– 280х14	– 900х9	100	3,94
ПБ2		– 300х14	– 1080х9	120	4,73
ПБ3		– 320х14	– 1260х9	140	5,52

В настоящем исследовании распространение трещины рассматривалось в пределах одного отсека, характерные положения трещины – посередине отсека и у ребра жесткости. Для того, чтобы учесть перераспределение напряжений в соседние отсеки, нагрузка прикладывалась по краям фрагмента балки, состоящей из трех отсеков (см. Рисунок 2.7).

Ввиду особенностей расчетной программы, для реализации стабильного расчета, фрагмент конструкции должен быть геометрически неизменяемым. Для этого предусматривалось его закрепление на торцах дополнительных отсеков, таким образом общая длина расчетной модели составила 7,5 м.

Трещина моделировалась как «разрыв» между стенкой и сжатым поясом, позволяющий свободно перемещаться верхней грани стенки относительно сжатого пояса. Оболочечные элементы поперечных ребер жесткости, поясов и стенка вне трещины жестко соединены между собой в узлах. Основным геометрический параметр горизонтальной трещины – относительная длина, вычисляемый по формуле:

$$\bar{l}_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} / a_{\text{отс}} = [0,00 \dots 1,00], \quad (2.1)$$

где $l_{\text{тр}}$ – длина трещины, $a_{\text{отс}}$ – ширина отсека.



Рисунок 2.4. Общий вид цеха с подкрановыми балками и мостовым краном



Рисунок 2.5. Вид подкрановой балки вдоль здания

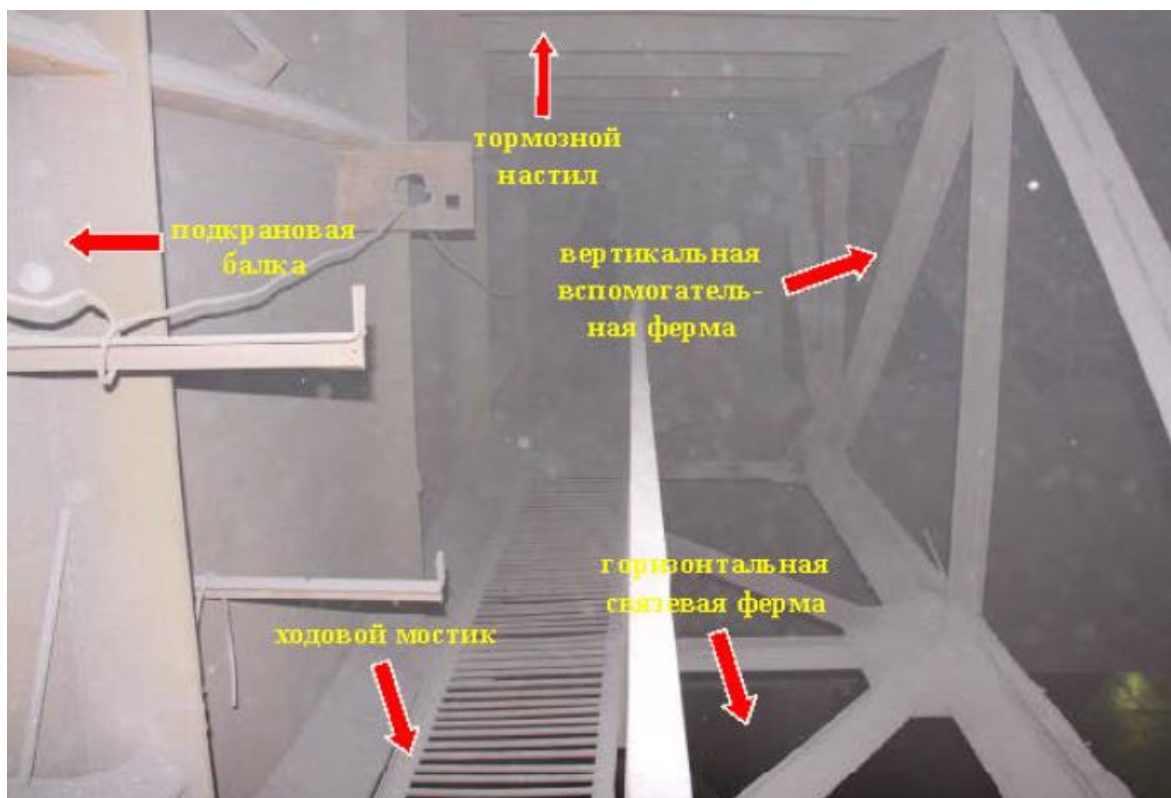


Рисунок 2.6. Вид подкрановых конструкций со стороны ходовых мостков

Для задания граничных условий подкрановой балки нужно уточнить реальные условия эксплуатации и режимов работы кранов (общий виды

конструкций показаны на Рисунках 2.4 – 2.6). Подкрановые конструкции с кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы включают в себя: подкрановые балки с рельсами, тормозные конструкции (как правило, сплошной настил с ребрами жесткости, приваренный к сжатому поясу) и связевые фермы, вместе обеспечивающие пространственную жесткость и геометрическую неизменяемость конструкции. В связи с изложенным, численные исследования осуществляются при соблюдении следующих граничных условий опорных сечений: свободные повороты относительно осей x, y ; отсутствие вертикальных смещений вдоль оси z ; отсутствие кручения (поворота относительно оси z). Наличие жесткого настила, приваренного к верхнему поясу, и связевой фермы по нижнему поясу балки, крепление которой осуществляется в том числе к опорным сечениям, имитируется в виде сплошного закрепления верхнего пояса и узлов нижнего пояса от смещения из плоскости балки (вдоль оси x) и дополнительного закрепления верхнего пояса от кручения относительно оси y . Закрепление в ANSYS Workbench осуществлялось в узлах при помощи функции Nodal Displacement (ramped displacement). Пространственная расчетная модель фрагмента подкрановой балки с приложенной нагрузкой в виде напряжений при действии изгибающего момента и поперечной силы показана на Рисунке 2.7.

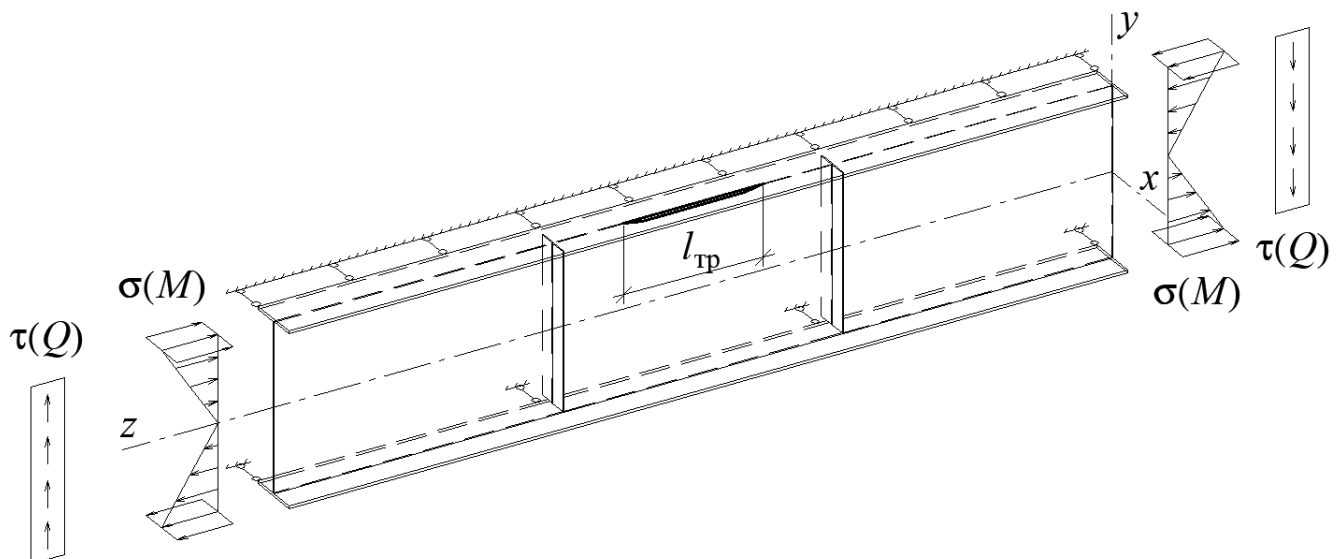


Рисунок 2.7. Общий вид расчетной модели подкрановой балки с граничными условиями и приложенной нагрузкой

Устойчивость стенки балки определяется с учетом ее фактического упругого защемления в поясах, степень которого зависит от соотношения их жесткостей. Фактические граничные условия стенки с трещиной при такой расчетной модели – упругое защемление в поясах и ребрах жесткости и свободный край в зоне трещины (допускается смещение несвязанного участка стенки относительно сжатого пояса). Граничные условия при решении бифуркационной задачи устойчивости стенки можно представить в следующем виде: свободный край в зоне трещины и шарнирное опирание по остальным сторонам (см. Рисунок 2.8).

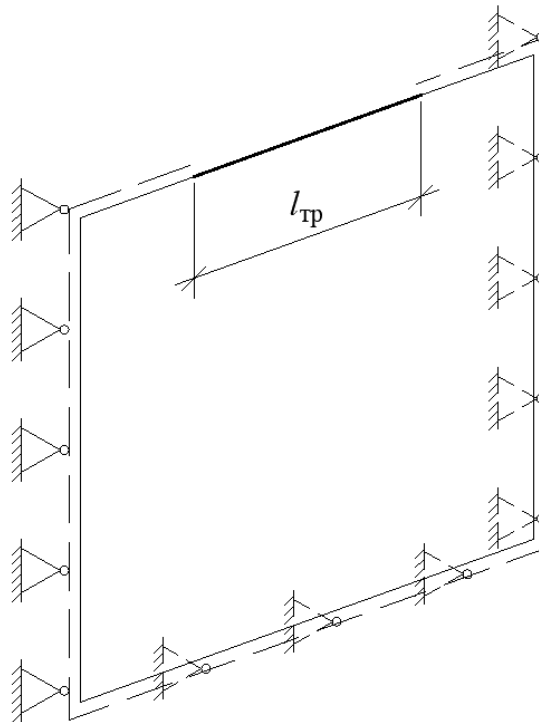


Рисунок 2.8. Упрощенная схема граничных условий поврежденной стенки

Как отмечалось выше, чтобы добиться стабильного расчета, конструкция должна быть геометрически неизменяемой, для этого в численных расчетах МКЭ в опорных сечениях применялись контактные КЭ типа Joints конфигурации Body – Ground. При использовании таких граничных условий не происходит деформации сечений и в то же время контур торцевых сечений сохраняется недеформируемым в процессе нагружения (аналог полной шарнирной опоры).

Разбивка сетки КЭ осуществлялась при помощи препроцессоров ANSYS, блок Mesh, дополнительные настройки: порядок КЭ (Element Order) – Quadratic; разрешение (Resolution) – 5; максимальная длина грани КЭ принята 5 см, т.к. при

таком размере КЭ достигается оптимальная точность расчета. Общий вид КЭ-схемы фрагмента подкрановой балки с сеткой см. Рисунок 2.9. Для избегания сингулярности и ошибок в расчетах в крайних точках трещин производилось учащение конечно-элементной сетки (см. Рисунок 2.10).

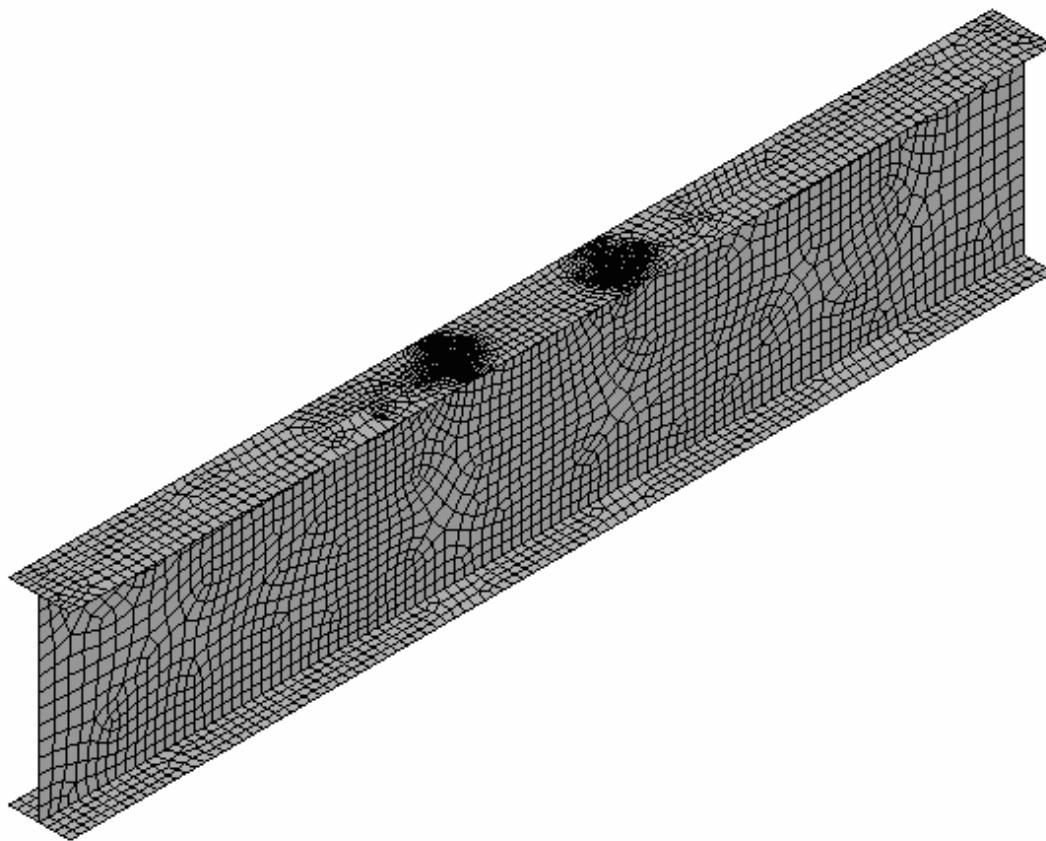


Рисунок 2.9. Общий вид конечно-элементной модели балки

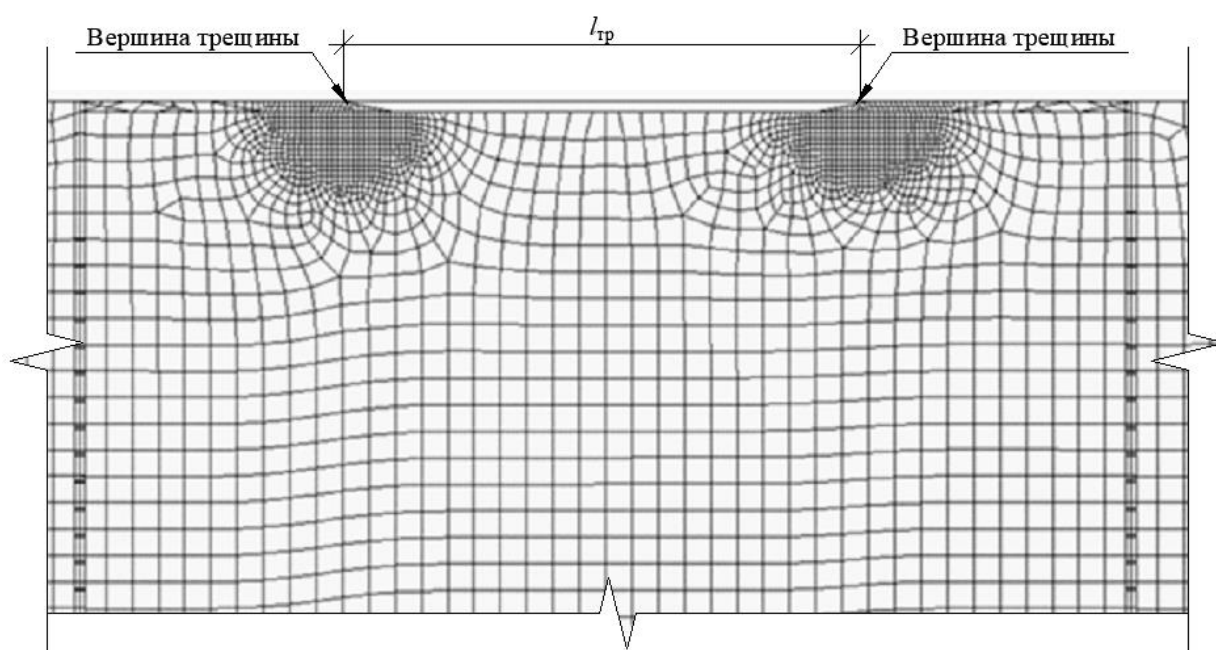


Рисунок 2.10. Фрагмент КЭ-модели с учащением сетки в зоне трещины

Приложение нагрузки в расчетной модели осуществляется в виде определенного количества сил к узлам КЭ (Nodal Force), значения которых зависят от действующей внешней нагрузки и внутренних усилий.

В общем случае загрузки подкрановой балки сосредоточенными вертикальными и горизонтальными давлениями от колес крана F_k и T_k , в результате их действия возникают следующие внутренние усилия: изгибающие моменты в плоскости и из плоскости балки M_x , M_y , соответствующие им поперечные силы Q_x , Q_y , продольные усилия N и бимоментные усилия B_ω .

При воздействии колеса крана непосредственно на участке с трещиной верхний пояс придавливается к стенке, в ней возникает сложное напряженно-деформированное состояние, участок стенки под трещиной испытывает дополнительное смятие и включается в работу, вследствие чего разгружаются пояса балки. В настоящем исследовании рассматривается наименее выгодный случай действия нагрузок, при котором колеса крана находятся вне поврежденного отсека ($F_{loc} = 0$) и включение стенки в работу балки – минимально.

Как правило, в конструкциях с мостовыми кранами тяжелого и весьма тяжелого режимов работы тормозная конструкция проектируется в виде сплошного настила, закрепляющего балку в горизонтальной плоскости, следовательно, напряжения от продольного усилия N и бимомента B_ω в элементах подкрановой балки оказываются незначительными, которыми в расчетах можно пренебречь.

Согласно действующим нормам проектирования в расчетах подкрановых балок принимается, что изгибающий момент и поперечная сила из плоскости балки M_y и Q_x воспринимаются только верхним сжатым поясом и тормозной конструкцией, поэтому их влияние на изменение работы балок с трещинами в стенке не учитывается.

Учитывая изложенное, расчет подкрановой балки проведем при действии изгибающего момента в плоскости балки M_x и соответствующей ему поперечной силы Q_y (далее по тексту M и Q). Изгибающий момент M , как известно,

воспринимается всем сечением подкрановой балки, а поперечная сила Q только стенкой (см. Рисунок 2.11а).

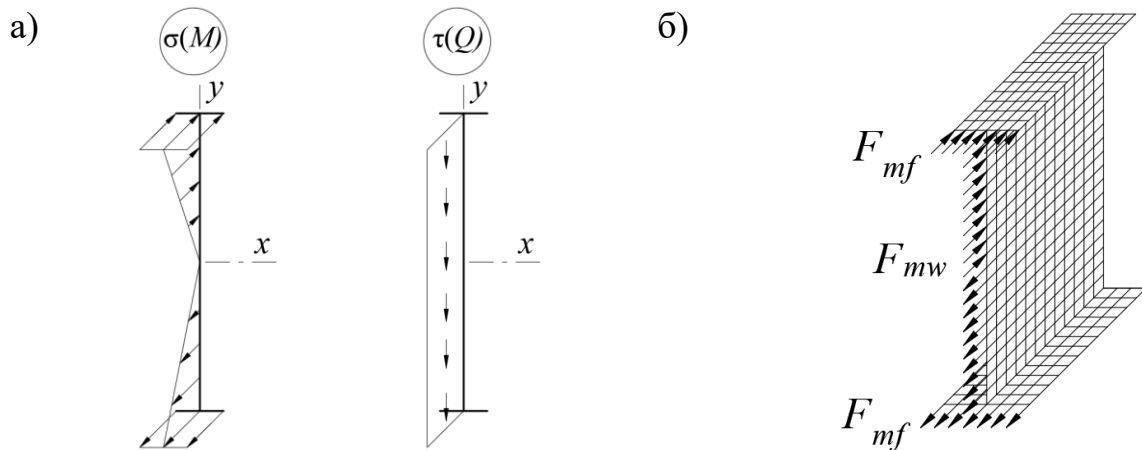


Рисунок 2.11. Формирование нагрузок на КЭ: а) схема нагрузок на элементы балки; б) схема приложения нагрузки к загруженному торцу балки

Конечные элементы типа SHELL181 позволяют прикладывать нагрузку в виде сил к узлам КЭ (см. Рисунок 2.11б), значения которых F_{mf}^x (на пояса) и F_{mw}^x и F_{mw}^y (на стенку) могут быть получены от действия M и Q .

Найдем компоненты нормальных и касательных напряжений в срединной поверхности полок и стенки от действия соответствующих усилий на торцах КЭ:

$$\sigma_{mx} = \frac{M}{I_x} y_m; \quad (2.2)$$

$$\tau_{mxy} = \frac{Q}{t_w h_w}, \quad (2.3)$$

где y_m – координата центра тяжести КЭ торцевых сечений.

Тогда силы F_{mf}^x , F_{mw}^x и F_{mw}^y , приложенные в узлах КЭ можно выразить через компоненты напряжений:

$$F_{mf}^x = \sigma_{mx} t_f a_f; \quad (2.4)$$

$$F_{mw}^x = \sigma_{mx} t_w a_w; \quad (2.5)$$

$$F_{mw}^y = \tau_{mxy} t_w a_w, \quad (2.6)$$

где a_w , a_f – размеры сторон конечных элементов соответственно стенки и поясов, t_w , t_f – их толщины (см. Рисунок 2.12).

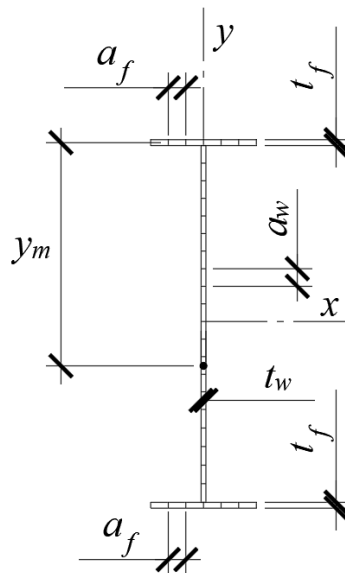


Рисунок 2.12. Схема вычисления нагрузки на КЭ

Таким образом, путем приложения локальных сил F_{mf}^x , F_{mw}^x и F_{mw}^y в узлах торцевых сечений, достигается полное соответствие между балочной и конечно-элементной расчетными схемами.

2. 2. Алгоритм расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке

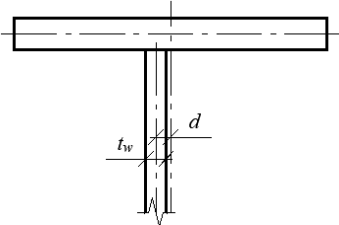
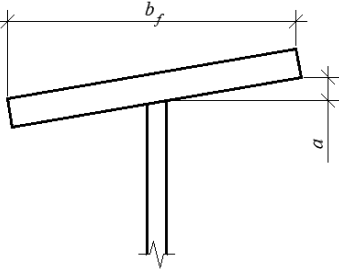
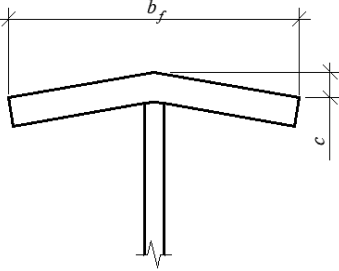
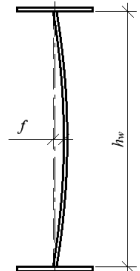
Общий вид расчетной схемы подкрановой балки с усталостной трещиной в стенке с вариантом приложения нагрузки в виде изгибающих моментов и поперечных сил с характерными закреплениями показан на Рисунке 2.7, подробное описание формирования расчетной модели приведено в п. 2. 1. Алгоритм определения напряженно-деформированного состояния поврежденной балки разделяется на 2 этапа.

Этап I. Определение форм начальных геометрических несовершенств поврежден-ной подкрановой балки

Известно, что в процессе изготовления и монтажа стальных конструкций имеют место несовершенства, которые учитываются в расчетах подкрановых балок по предельным состояниям. Согласно техническим условиям на стальные

конструкции [25], для подкрановых балок устанавливаются допускаемые виды геометрических отклонений, представленных в Таблице 2.2.

Таблица 2.2. Допуски геометрических параметров подкрановых балок

Вид предельного отклонения	Эскиз	Значение предельного отклонения
1. Смещение стенки относительно оси полки d		Не более $0,5t_w$
2. Перекос сжатой полки подкрановых балок относительно стенки a		$0,005b_f$
3. Грибовидность полки с сжатых поясов подкрановых балок		$0,005b_f$
4. Стрела выгиба не укрепленной ребрами стенки подкрановой балки f		$0,003h_w$

В приведенных технических условиях даны значения допусков на подкрановые балки без трещин, при которых их действительное напряженно-деформированное состояние фактически не отличается от теоретического. В процессе эксплуатации с появлением и развитием трещин эти несовершенства получают соответствующее развитие, которое необходимо учитывать при проверке несущей способности подкрановых балок с трещинами. В работе [22] приведены

результаты обследования значительного количества эксплуатируемых подкрановых балок, в том числе замеры отклонений геометрии балок, и показано, что в эксплуатируемых балках значения отклонений могут превышать предельные нормативные в 2 и более раз. Как показал опыт эксплуатации стальных конструкций [79, 86-88], в подкрановых балках с усталостными трещинами в верхней зоне стенки значения предельных отклонений могут достигать следующих значений:

- смещение стенки относительно оси полки $d = t_w$;
- перекося и грибовидность полки $a = c = 0,02b_f$;
- местное выпучивание стенки $f = 0,01h_w$.

Влияние трещин на устойчивость и несущую способность поврежденных стенок определялось с учетом начальных геометрических несовершенств в виде местных выпучиваний. При этом их формы принимались по первым (как наихудшим) формам потери устойчивости поврежденной стенки, получаемых в результате решения соответствующих бифуркационных задач устойчивости. Влияние трещин на снижение несущей способности пояса определялось с учетом дополнительного влияния его несовершенств: отрыва от стенки в зоне трещины и местной гибели со стороны крана, результаты исследований приведены в п. 3. 1. 1. Для определения формы местной потери устойчивости стенки, выполняется расчет в модуле Eigenvalue Buckling по заданному виду нагружения в модуле Static Structural. Подробное описание результатов решений бифуркационной задачи устойчивости стенки приведено в п. 2. 3.

Этап II. Решение деформационной задачи поврежденного фрагмента балки

Деформационная задача решается в модуле Static Structural, схема нагружения балки соответствует расчетной схеме, приведенной на Рисунке 2.7. Задание геометрических несовершенств осуществляется при помощи команд программирования APDL из файла результатов расчета, полученного после завершения этапа I. Деформационный расчет производится с учетом геометрической нелинейности конструкции, в настройках расчета: количество шагов – 100 (Auto Time Stepping – Off), опция Large Deflection – On. Количество

шагов загрузки определялось методом итерации, погрешность результатов расчета при таком числе шагов не превышает 3% при значительном увеличении времени расчета.

Геометрические несовершенства при расчете устойчивости стенки, как уже упоминалось, принимаются в виде местных выпучиваний, формы которых соответствуют их первым формам потери устойчивости. Для определения расчетных критических параметров устойчивости стенки, нагрузка на последнем шаге загрузки принимается такой, чтобы критические напряжения соответствовали приблизительно $1,1\sigma_{cr}$ и $1,1\tau_{cr}$, вычисленных по действующим нормам проектирования как для неповрежденных стенок. Результаты решения деформационной задачи устойчивости и выявленные зависимости снижения расчетных критических параметров напряжений стенки при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы приведены в п. 2. 4.

Общий алгоритм определения напряженно-деформированного состояния подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке с учетом геометрических несовершенств показан на блок-схеме Рисунка 2.13.



Рисунок 2.13. Блок-схема алгоритма определения напряженно-деформированного состояния поврежденной подкрановой балки с учетом геометрических несовершенств

2. 3. Решение бифуркационной задачи устойчивости стенки с трещиной

При разработке метода расчета устойчивости стенок подкрановых балок, поврежденных усталостными трещинами, было показано, что необходимо знать формы потери устойчивости таких элементов, которые вытекают из решения соответствующих бифуркационных задач устойчивости. Чтобы в расчетном комплексе воссоздать потерю местную устойчивость стенки и получить искомые формы, в ANSYS выполняется расчет Eigenvalue Buckling (см. Рисунок 2.14). Важно отметить, что упомянутый расчет рассматривает бифуркационную устойчивость по Эйлеру, т.е. позволяет определить критическую силу и форму потери устойчивости без учета деформационной составляющей. Поэтому результатами данного расчет можно пользоваться только для получения деформированной схемы для последующих деформационных расчетов.

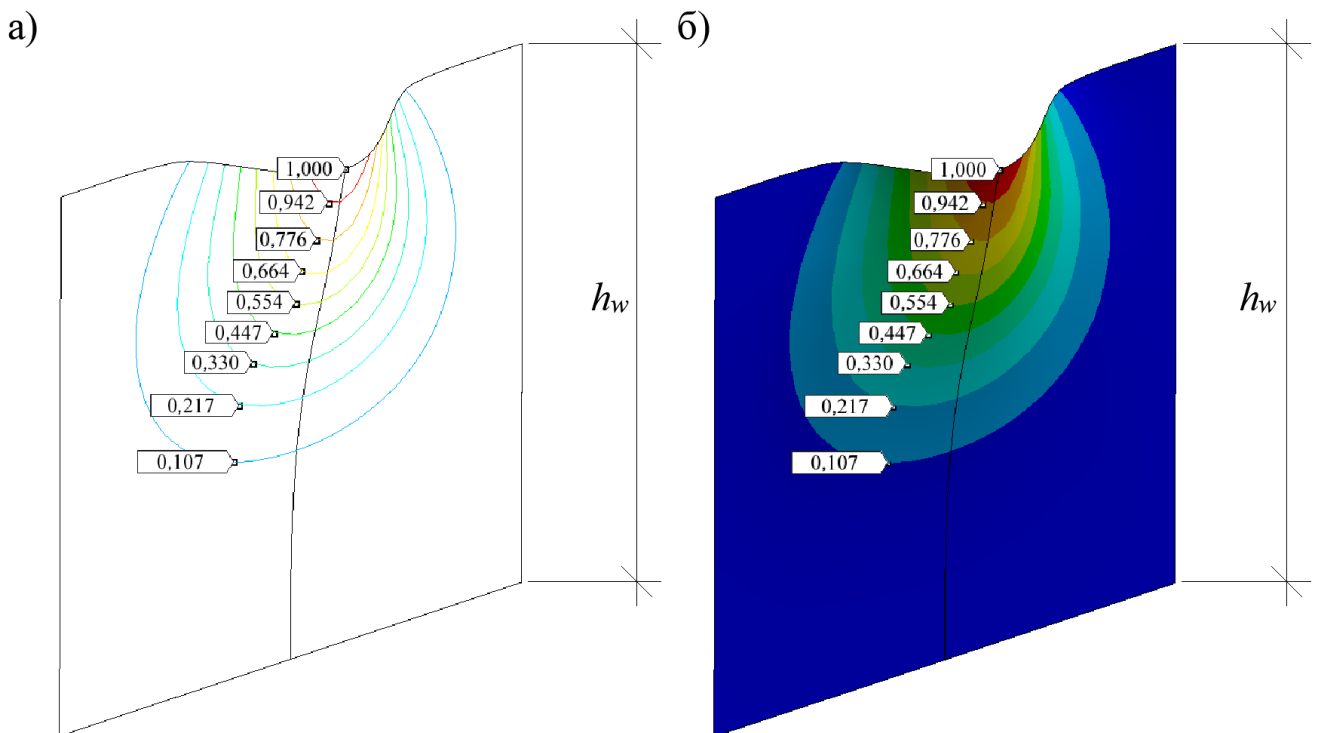


Рисунок 2.14. Формы потери местной устойчивости стенки: а) в изополях; б) в изолиниях

Расчетная модель подкрановой балки имеет такие закрепления, что потеря местной устойчивости стенки будет происходить раньше, чем потеря общей устойчивости балки. Это позволяет использовать первую форму потери

устойчивости, которая имеет наименьшую критическую силу, для дальнейшего деформационного расчета.

Рассмотрим решения бифуркационных задач устойчивости стенки при различных силовых воздействиях.

2. 3. 1. Устойчивость при чистом изгибе

Исследуем влияние трещины на изменение бифуркационных форм потери местной устойчивости стенки при чистом изгибе. Расчетная схема фрагмента подкрановой балки с указанием действующих нагрузок при воздействии изгибающих моментов показана на Рисунке 2.15.

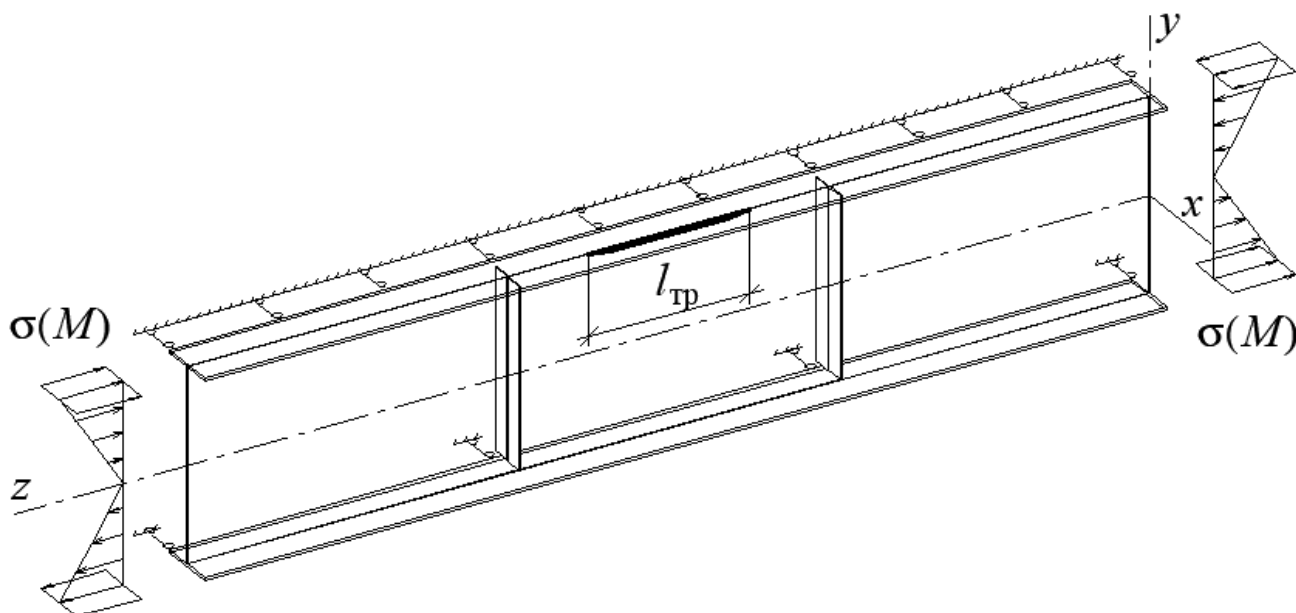


Рисунок 2.15. Расчетная схема подкрановой балки с трещиной при чистом изгибе

В Таблицах 2.3 – 2.4 показаны формы потери устойчивости стенки с трещиной, имеющей относительную длину $\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс} = [0...1]$, в середине отсека и у ребра жесткости при чистом изгибе.

Таблица 2.3. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной
при чистом изгибе (начало)

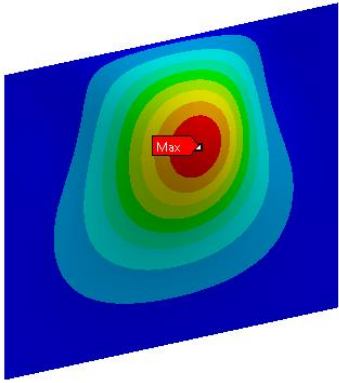
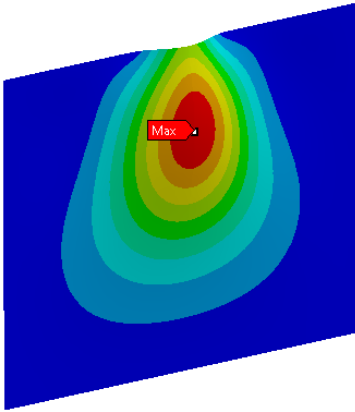
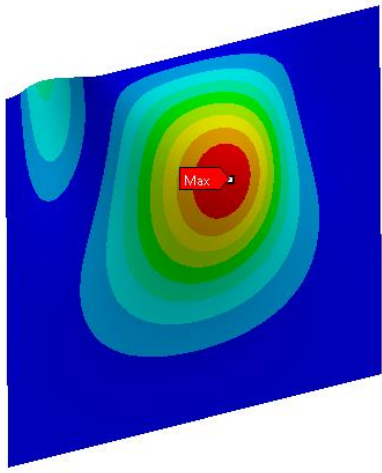
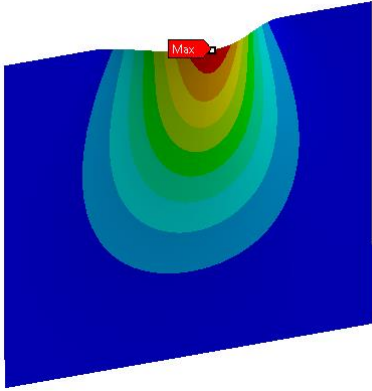
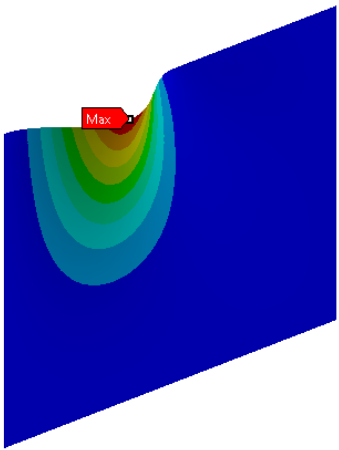
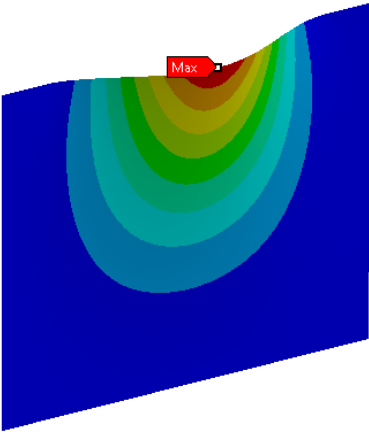
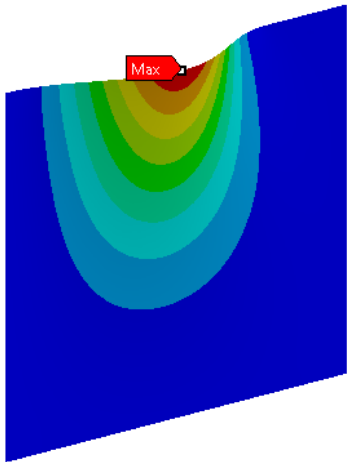
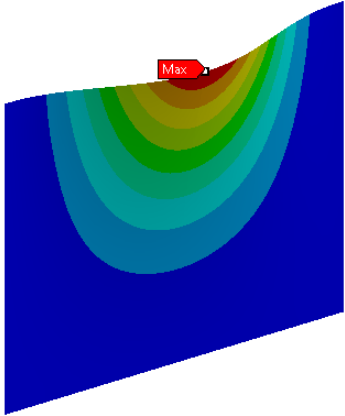
Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,00$ (эталон)		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,25$		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,50$		

Таблица 2.4. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной
при чистом изгибе (окончание)

Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,75$		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 1,00$		

Из Таблицы 2.3 видно, что при появлении и развитии трещины весьма значительно изменяется форма потери устойчивости стенки. В стенке без трещины форма потери устойчивости стенки соответствует теоретическим результатам, полученным еще в работах [15, 23, 109] в начале прошлого столетия. В стенке с трещиной длиной $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,50$ и более максимальные отклонения стенки возникают в наиболее удаленной от центра точке у сжатого пояса в середине трещины. С увеличением длины трещины максимальное отклонение возрастает. Положение трещины весьма существенно влияет на изменение формы потери устойчивости, например, при трещине у ребра с длиной $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,25$ форма практически не изменяется по сравнению со стенкой без трещины, при этом во всех случаях длин трещин максимальные отклонения соответствуют середине трещин.

2. 3. 2. Устойчивость при чистом сдвиге

Рассмотрим изменение форм потери устойчивости стенок при чистом сдвиге. Расчетная схема фрагмента подкрановой балки с указанием действующих нагрузок при воздействии поперечных сил приведена на Рисунке 2.16.

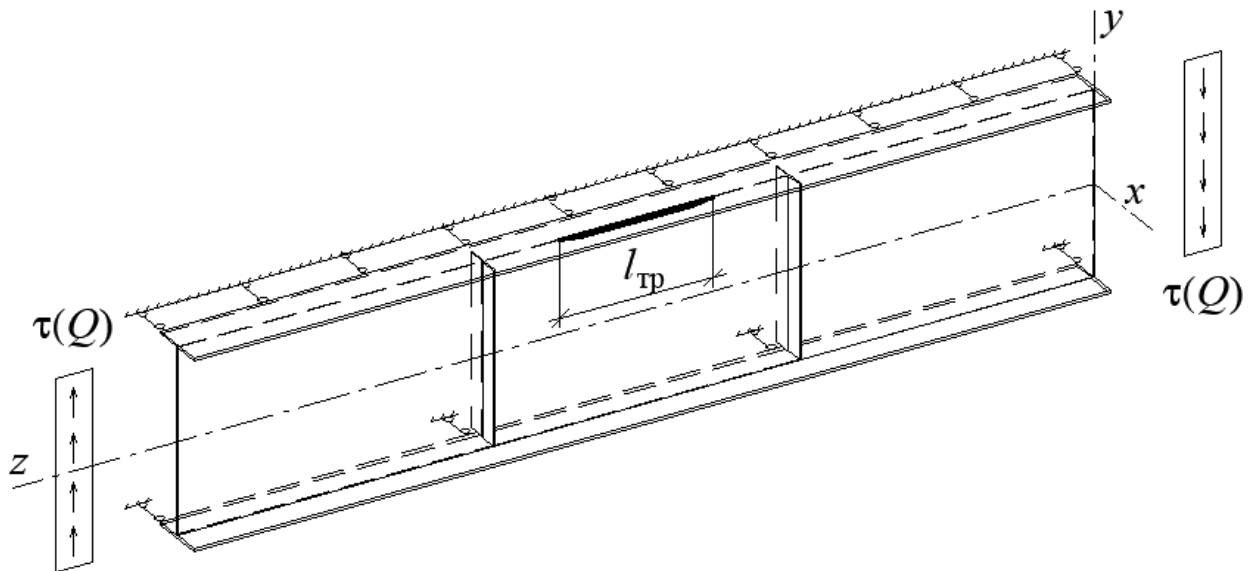


Рисунок 2.16. Расчетная схема подкрановой балки с трещиной при чистом сдвиге

Формы потери устойчивости стенки балки с трещиной посередине отсека и с трещиной у поперечного ребра жесткости при относительной длине трещины $\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс} = [0...1]$ показаны в Таблицах 2.5 – 2.7.

Таблица 2.5. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной при чистом сдвиге (начало)

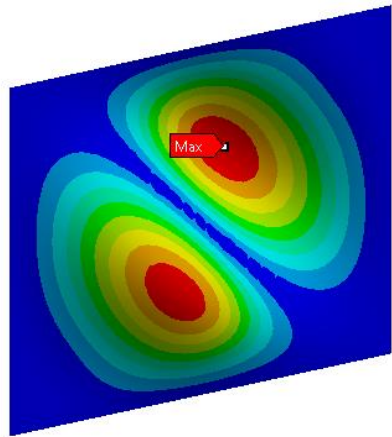
Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{тр} = 0,00$ (эталон)		

Таблица 2.6. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной
при чистом сдвиге (продолжение)

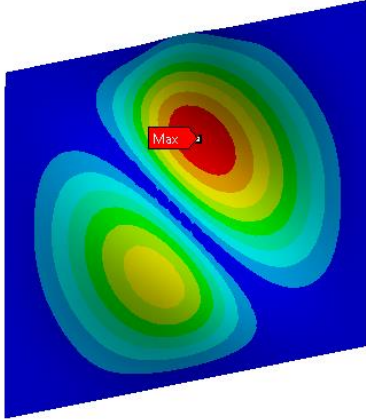
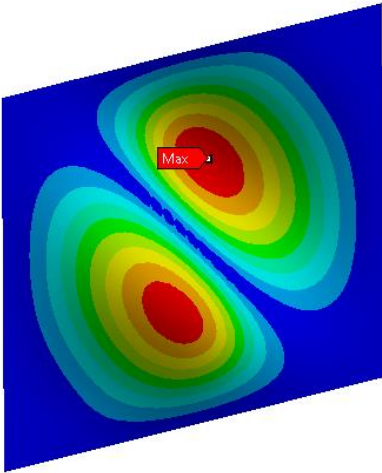
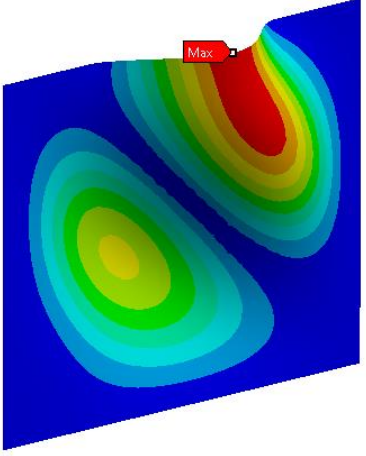
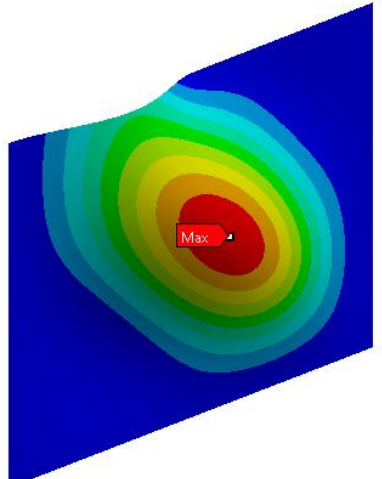
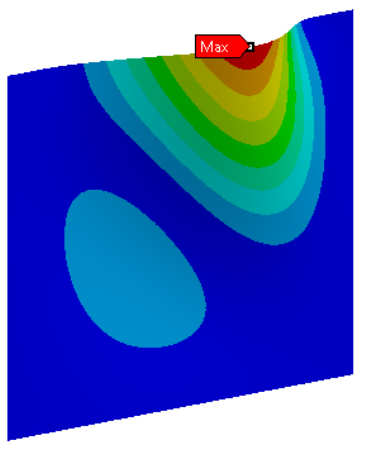
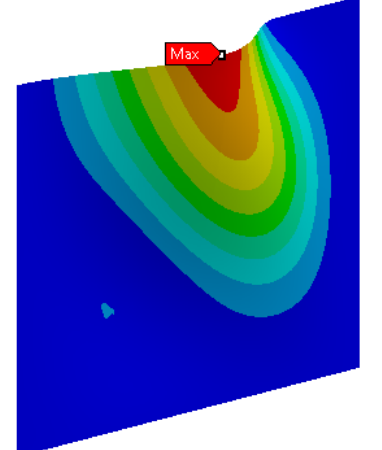
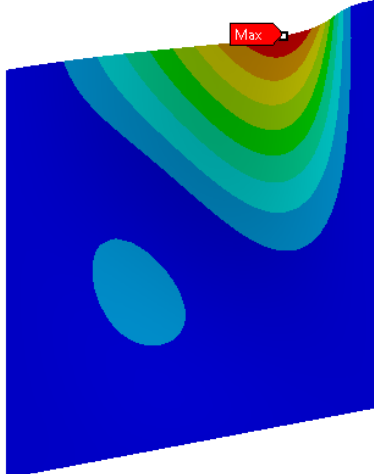
Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,25$		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,50$		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,75$		

Таблица 2.7. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной
при чистом сдвиге (окончание)

Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{тр} = 1,00$		

Форма потери устойчивости стенки без трещины соответствует теоретическим результатам и при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ не претерпевает значительных изменений от эталона. При трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,50$ форма потери устойчивости изменяются и максимальные отклонения перемещаются в точки у сжатого пояса. В зависимости от положения трещины при ее длине $\bar{l}_{тр} = 0,75$ форма потери устойчивости качественно не изменяется.

2. 3. 3. Устойчивость при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Далее покажем изменение бифуркационных форм потери местной устойчивости стенок при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил. Расчетную схему фрагмента подкрановой балки с указанием действующих нагрузок показана на Рисунке 2.17.

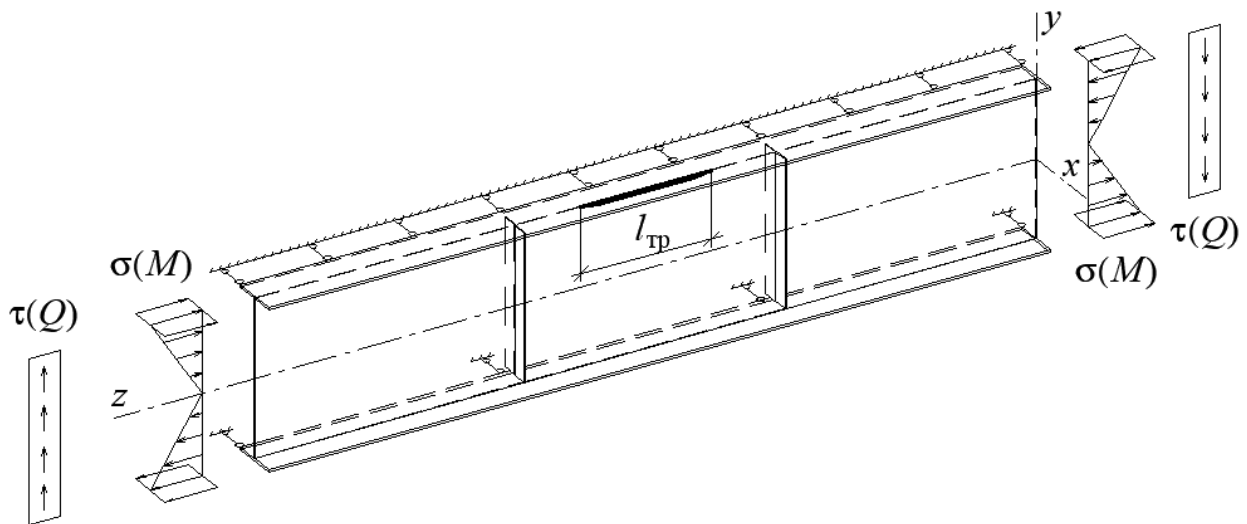


Рисунок 2.17. Расчетная схема балки при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил с трещиной: а) посередине отсека, б) у ребра жесткости

Формы потери устойчивости стенки балки с трещиной посередине отсека и с трещиной у поперечного ребра жесткости при относительной длине трещины $\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс} = [0...1]$ показаны в Таблица 2.8 – 2.10.

Таблица 2.8. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил (начало)

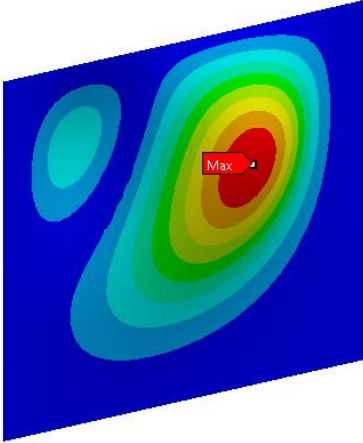
Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{тр} = 0,00$ (эталон)		

Таблица 2.9. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил (продолжение)

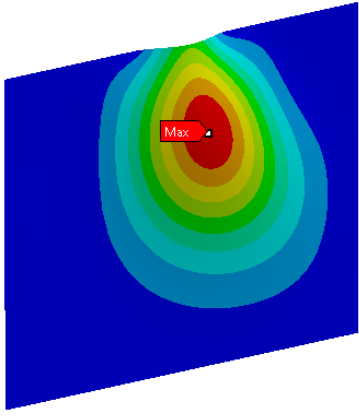
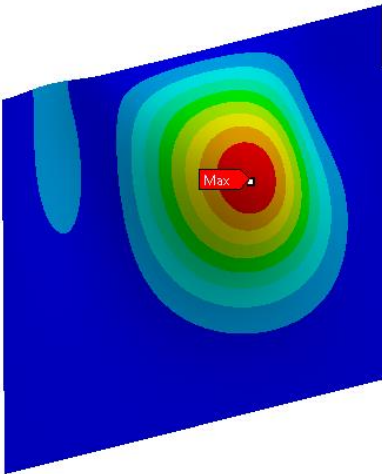
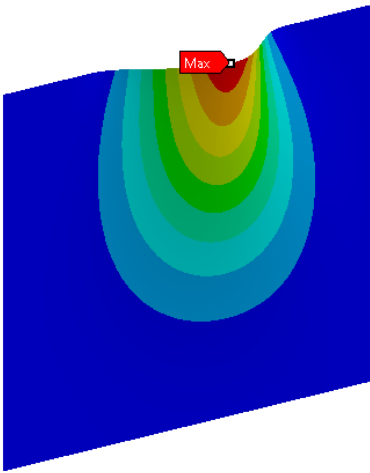
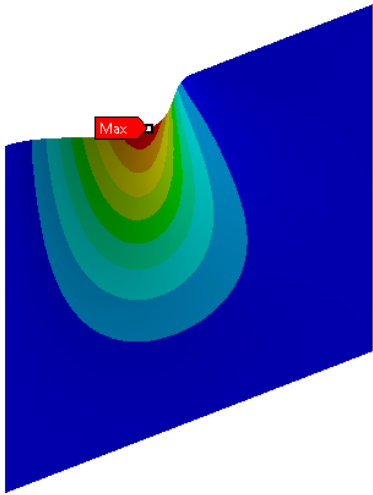
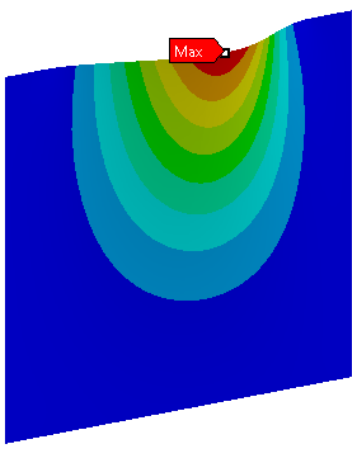
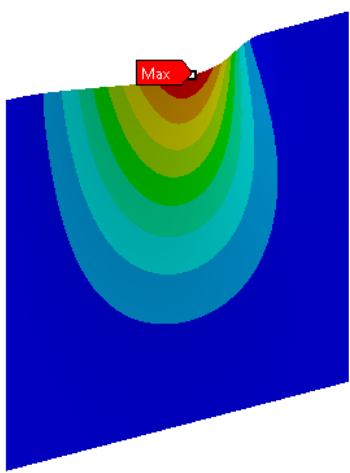
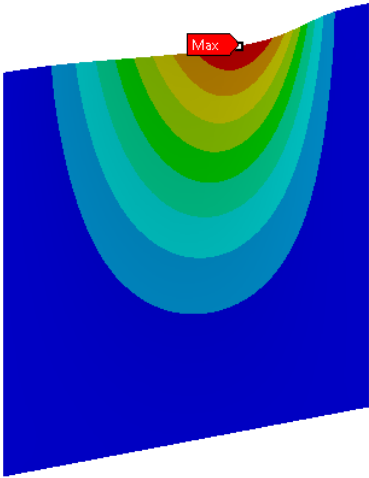
Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,25$		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,50$		
$\bar{l}_{\text{тр}} = 0,75$		

Таблица 2.10. Формы потери местной устойчивости стенки с трещиной при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил (окончание)

Относительная длина трещины	Трещина посередине отсека	Трещина у ребра жесткости
$\bar{l}_{\text{тр}} = 1,00$		

Бифуркационные формы потери местной устойчивости стенок при совместном действии изгибных усилий претерпевают значительные изменения при трещине малой длины $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,25$. Важно отметить, что очертание формы потери устойчивости зависит от соотношений действующих усилий. В Таблице 2.5 показаны формы потери устойчивости при большем влиянии изгибающего момента.

2. 4. Результаты решения деформационной задачи устойчивости стенки

Задача устойчивости стенки с усталостной трещиной решалась с учетом геометрических несовершенств в виде ее местных выпучиваний (см. рис. 2.18), которые масштабировались в зависимости от высоты h_w . Максимальное отклонение стенки было принято в соответствии с техническими условиями на стальные конструкции и составило $f_{0w} = 0,003h_w$ [25].

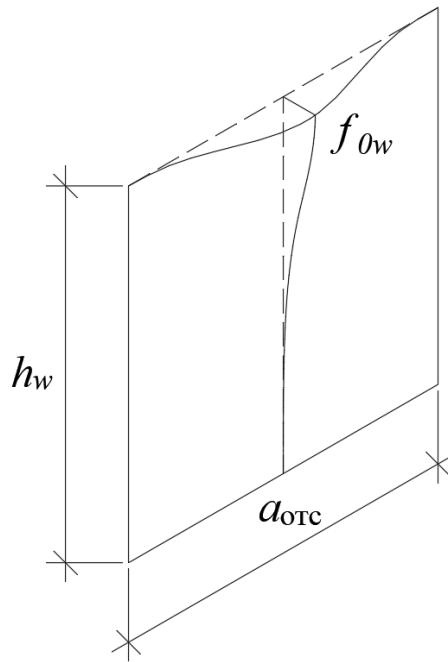


Рисунок 2.18. Схема местных выпучиваний стенки с трещиной

Влияние начальных несовершенств на снижение критических напряжений стенки без трещины показано на графиках Рисунка 2.19. На них приведено сравнение бифуркационных критических σ_{cr}/τ_{cr} и расчетных критических (нормативных) $\sigma_{cr,ef}/\tau_{cr,ef}$ напряжений стенок балок без трещины в зависимости от ее гибкости. Снижение критических параметров устойчивости стенки, связанные с введением начальных несовершенств, приведено в относительных параметрах:

$$\bar{\sigma}_{cr} = \sigma_{cr} / \sigma_{cr}^* ; \quad (2.7)$$

$$\bar{\sigma}_{cr,ef} = \sigma_{cr,ef} / \sigma_{cr}^* ; \quad (2.8)$$

$$\bar{\tau}_{cr} = \tau_{cr} / \tau_{cr}^* ; \quad (2.9)$$

$$\bar{\tau}_{cr,ef} = \tau_{cr,ef} / \tau_{cr}^* , \quad (2.10)$$

где σ_{cr}^* и τ_{cr}^* – критические напряжения стенки со средним значением условной гибкости $\bar{\lambda}_w = 4,73$.

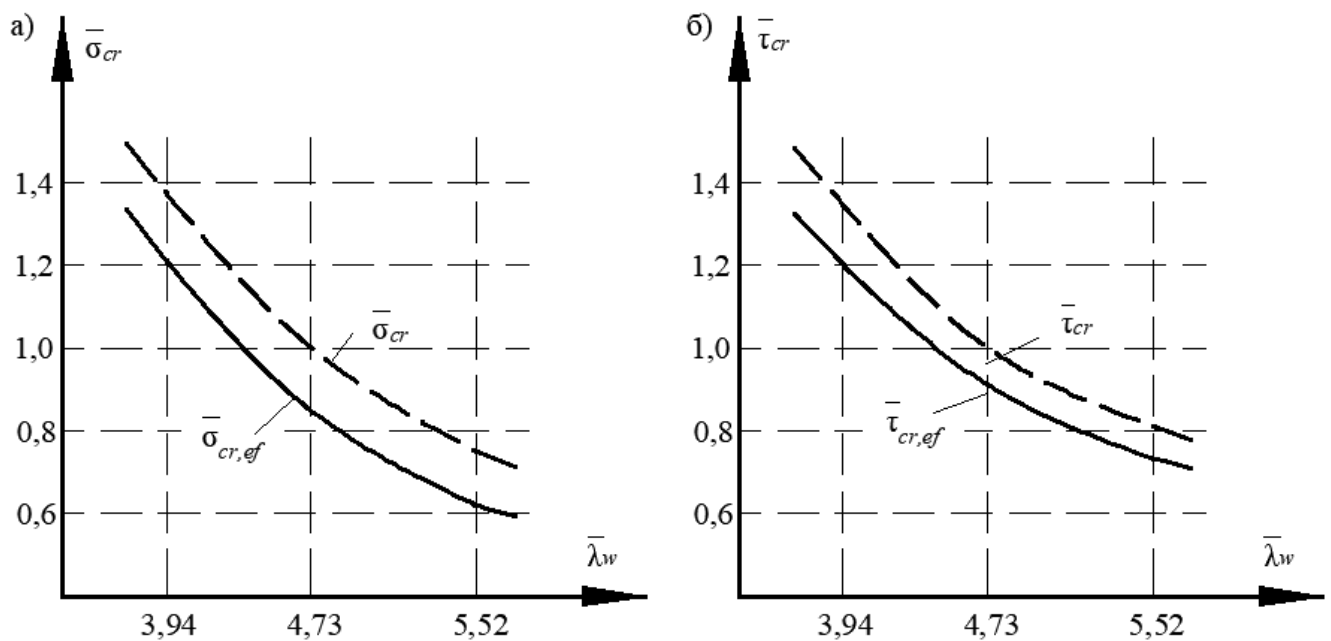


Рисунок 2.19. Зависимости критических параметров напряжений от гибкости стенки
а) при чистом изгибе; б) при чистом сдвиге.

Влияние несовершенств на снижение критических параметров устойчивости стенки (см. Рисунок 2.19) является существенным. При гибкости $\bar{\lambda}_w = 3,94$ отличие между критическими нормальными напряжениями составляет 11%, касательными – 10%. В стенке с гибкостью $\bar{\lambda}_w = 5,52$ отличия составляют соответственно 18% и 9%.

По отечественным нормам проектирования [100-101] расчетным критическим напряжениям неповрежденной стенки соответствуют такие значения, при которых в балке наступает предельное состояние. При этом напомним, что остаточные напряжения в шве и начальные геометрические несовершенства пластинок косвенным путем учитываются в $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$.

Исследуем влияние трещины на снижение расчетных критических параметров устойчивости стенки $\sigma_{cr,ef}^{тр}$ и $\tau_{cr,ef}^{тр}$ с учетом ее геометрических несовершенств. Следует заметить, что при напряжениях, близким к критическим, сжатая часть стенки становится менее загруженной, при этом продолжая нести нагрузку (20 – 28% от всего изгибающего момента, см. Рисунок 3.4), центр тяжести сечения смещается в сторону растянутого пояса, чему сопутствует увеличение напряжений в сжатом поясе (до 20%), который удерживается рельсом и тормозной

конструкцией. Определение расчетных критических напряжений стенки с трещиной осуществлялось при проектном положении сжатого пояса с учетом перераспределения усилий (см. Рисунок 2.20) по достижении предельного состояния в сечении балки. Влияние несовершенств пояса на несущую способность балки приведено в п. 3.1.

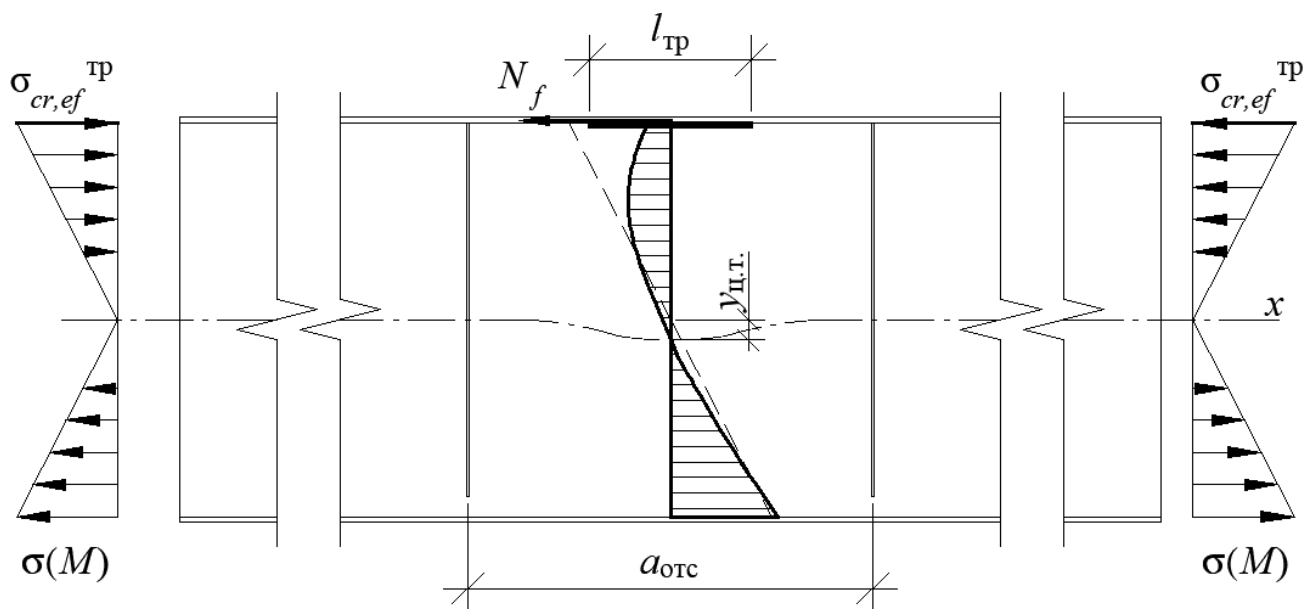


Рисунок 2.20. Схема загрузки балки при определении критических нормальных напряжений в стенке с учетом перераспределения усилий.

По расчетным моделям, показанным в п. 2.3, решаем деформационные (с учетом геометрических несовершенств) задачи стенки при различном положении и длине трещины в отсеке с раздельным действием изгибающего момента и поперечной силы. На графиках Рисунка 2.21 – 2.22 показаны зависимости расчетных критических параметров устойчивости стенки с трещиной. Для удобства совместной оценки, напряжения приведены в относительных параметрах:

$$\bar{\sigma}_{cr,ef}^{тр} = \sigma_{cr,ef}^{тр} / \sigma_{cr,ef}; \quad (2.11)$$

$$\bar{\tau}_{cr,ef}^{тр} = \tau_{cr,ef}^{тр} / \tau_{cr,ef}, \quad (2.12)$$

где $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$ – расчетные критические напряжения стенки без трещины с гибкостью $\bar{\lambda}_w = 4,73$.

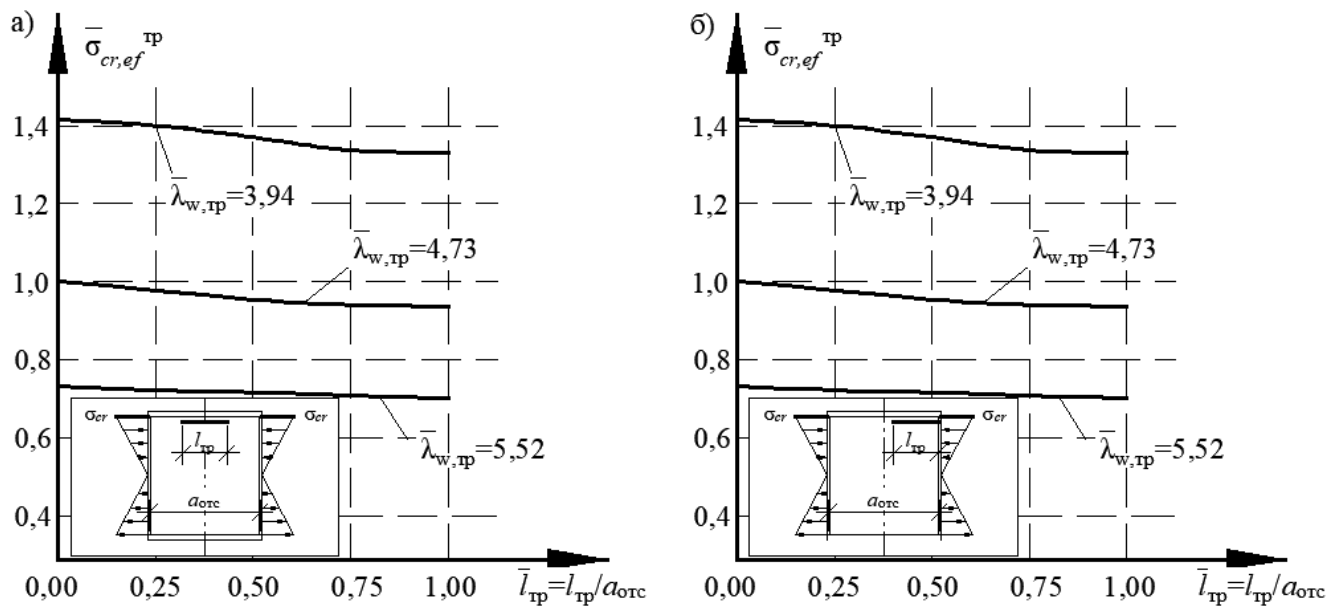


Рисунок 2.21. Зависимости закритических напряжений стенки при чистом изгибе с трещиной: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости.

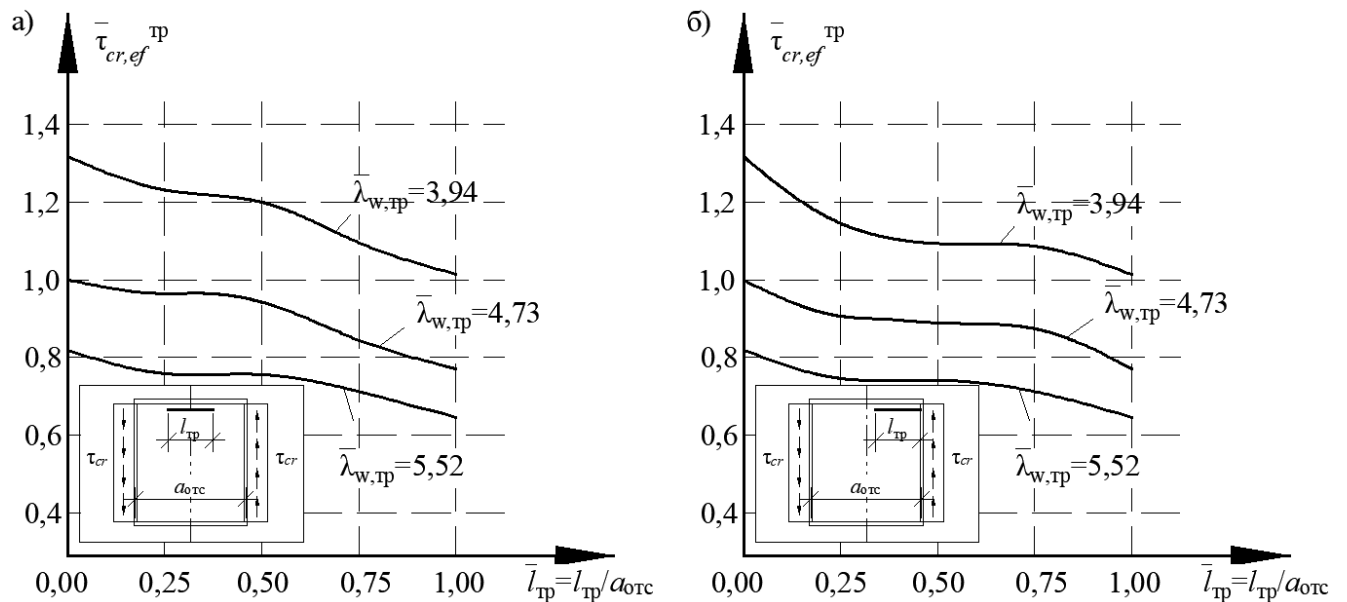


Рисунок 2.22. Зависимости закритических напряжений стенки при чистом сдвиге с трещиной: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости.

Анализируя полученные зависимости можно заключить, что трещины весьма существенно влияют на снижение критических параметров устойчивости стенки. Характер снижения при различном положении трещины и гибкости стенки – однородный. При трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 1,00$ критические нормальные напряжения снижаются до 8%, касательные до 23%. Численные значения относительных параметров напряжений приведены в Таблицах 2.11 – 2.12, в них $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$ – расчетные критические напряжения стенки без трещины соответствующих

гибкостей. В числителе приведены относительные напряжения при положении трещины посередине отсека, в знаменателе – у ребра жесткости.

Таблица 2.11. Зависимости снижения относительных параметров нормальных напряжений

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $\bar{\sigma}_{cr,ef}^{тр} = \sigma_{cr,ef}^{тр} / \sigma_{cr,ef}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,25	$\frac{0,968}{0,977}$	$\frac{0,965}{0,973}$	$\frac{0,970}{0,975}$
0,50	$\frac{0,941}{0,944}$	$\frac{0,926}{0,943}$	$\frac{0,938}{0,947}$
0,75	$\frac{0,931}{0,933}$	$\frac{0,926}{0,926}$	$\frac{0,920}{0,924}$
1,00	0,931	0,923	0,915

Таблица 2.12. Зависимости снижения относительных параметров касательных напряжений

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $\bar{\tau}_{cr,ef}^{тр} = \tau_{cr,ef}^{тр} / \tau_{cr,ef}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,25	$\frac{0,930}{0,865}$	$\frac{0,940}{0,894}$	$\frac{0,946}{0,921}$
0,50	$\frac{0,909}{0,847}$	$\frac{0,933}{0,887}$	$\frac{0,946}{0,913}$
0,75	$\frac{0,821}{0,842}$	$\frac{0,834}{0,869}$	$\frac{0,861}{0,897}$
1,00	0,773	0,783	0,802

Из Таблиц 2.6 – 2.7 видно, что расчетные критические нормальные напряжения при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,50$ снижаются до 7,4%, касательные до 15,3%, при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 1,00$ соответственно до 8,5% и до 22,7%. При этом следует отметить, что положение трещины в отсеке и гибкость стенки в целом имеет незначительное влияние на снижение критических нормальных напряжений.

Исследуем влияние трещины на устойчивость стенки при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы. Расчет производим по деформированной схеме, по аналогии с решением задач чистого изгиба и сдвига,

схемы нагружений приведены в пп. 2.3.3. Полученные границы областей устойчивости стенки в зависимости от длины трещины и ее положения в отсеке приведены на Рисунках 2.23 – 2.25. Для совместной оценки зависимости также приведены в относительных параметрах, где $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$ – расчетные критические напряжения стенки без трещины соответствующей гибкости.

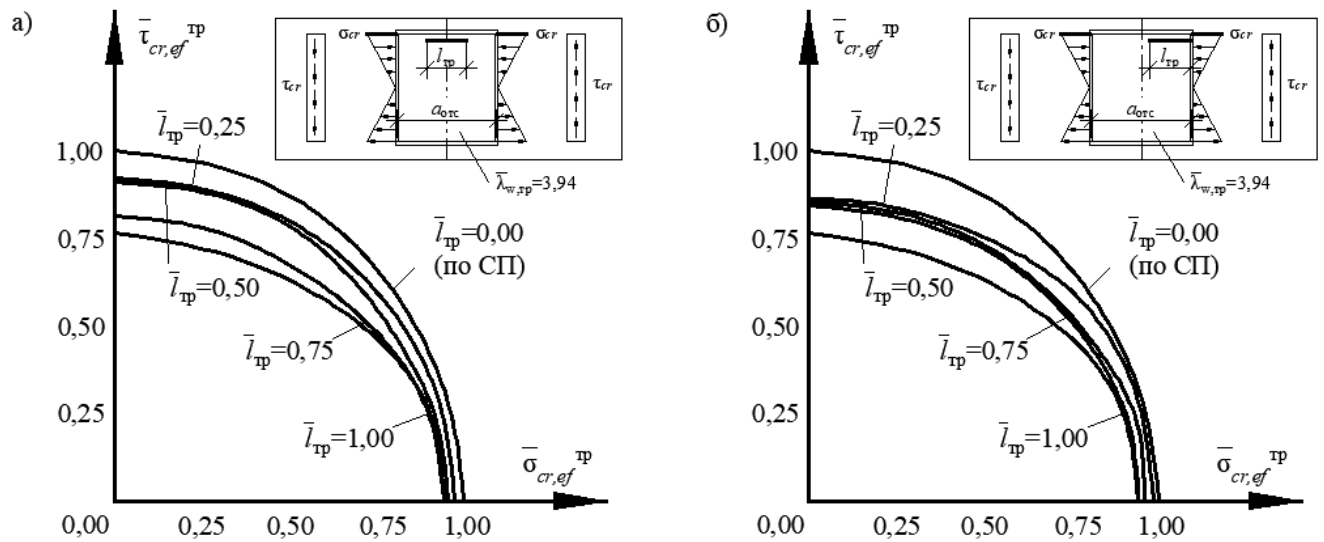


Рисунок 2.23. Границы областей устойчивости стенки с гибкостью $\bar{\lambda}_{w,тр} = 3,94$ в зависимости от длины трещины при ее положении: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости.

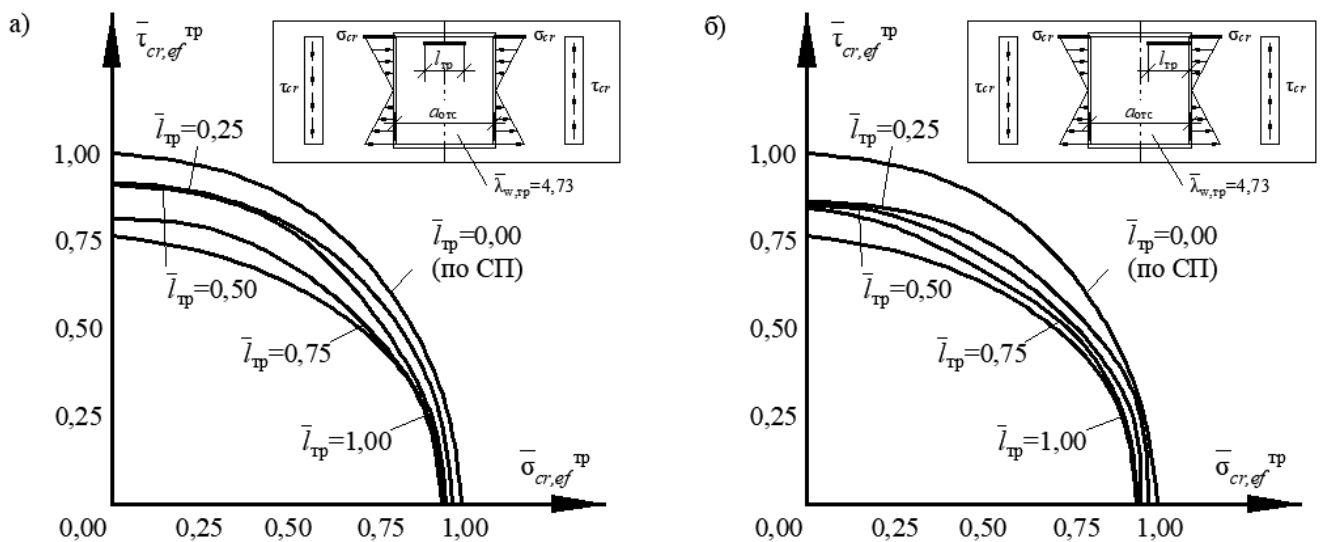


Рисунок 2.24. Границы областей устойчивости стенки с гибкостью $\bar{\lambda}_{w,тр} = 4,73$ в зависимости от длины трещины при ее положении: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости.

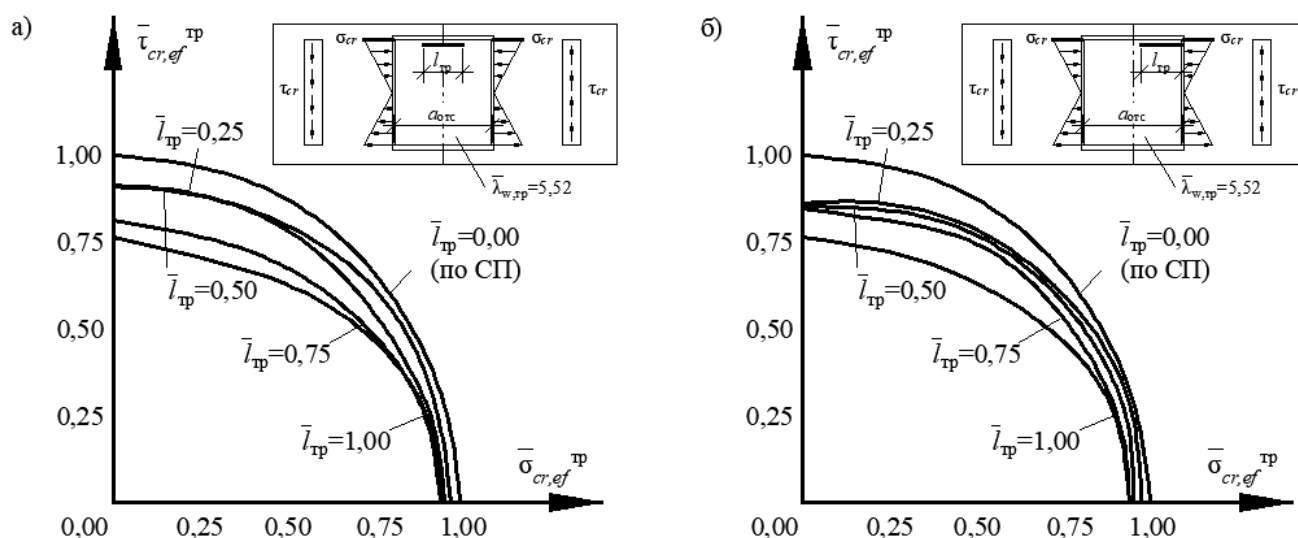


Рисунок 2.25. Границы областей устойчивости стенки с гибкостью $\bar{\lambda}_{w,тр} = 5,52$ в зависимости от длины трещины при ее положении: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости.

Из Рисунков 2.23 – 2.25 видно, что при трещинах значительной длины границы областей устойчивости стенки сужаются и в целом соответствуют четвертям эллипсов с центром в начале координат. Сжатый пояс подкрановой балки удерживает развитие трещины и деформирование стенки, в связи с чем расчетные критические нормальные напряжения стенки снижаются менее значительно, чем касательные. Общий характер изменения областей устойчивости в стенках различных гибкостей имеет общие тенденции, положение трещины мало влияет на снижение расчетных критических напряжений.

2. 5. Учет влияния трещин на снижение расчетных критических напряжений стенки

Учет влияния трещин на снижение расчетных критических напряжений стенки предлагается осуществлять понижающими коэффициентами $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ (см. Таблица 2.8) в зависимости от длины трещины и гибкости стенки. Таким образом, формулы определения критических параметров напряжений стенки с трещиной принимают следующий вид:

$$\sigma_{cr,ef}^{тр} = c_{1,тр} \sigma_{cr,ef}; \quad (2.13)$$

$$\tau_{cr,ef}^{тр} = c_{2,тр} \tau_{cr,ef}, \quad (2.14)$$

где $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ – коэффициенты влияния трещины на устойчивость стенки в зависимости от ее длины и гибкости стенки, которые приведены в Таблица 2.8; $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$ – критические напряжения стенки, вычисляемые в соответствии с СП 16.13330 как для целой балки без трещины.

Коэффициенты $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ определялись методом итераций по полученным границам областей устойчивости таким образом, чтобы «упрощенные» границы областей устойчивости поврежденной стенки соответствовали четвертям эллипсов с центром в начале координат. Принцип определения коэффициентов для областей устойчивости нестандартной кривизны наглядно показан на Рисунке 2.26. Полученных таким способом значения коэффициентов влияния трещины на устойчивость стенки в зависимости от ее гибкости и длины трещины приведены в Таблице 2.13.

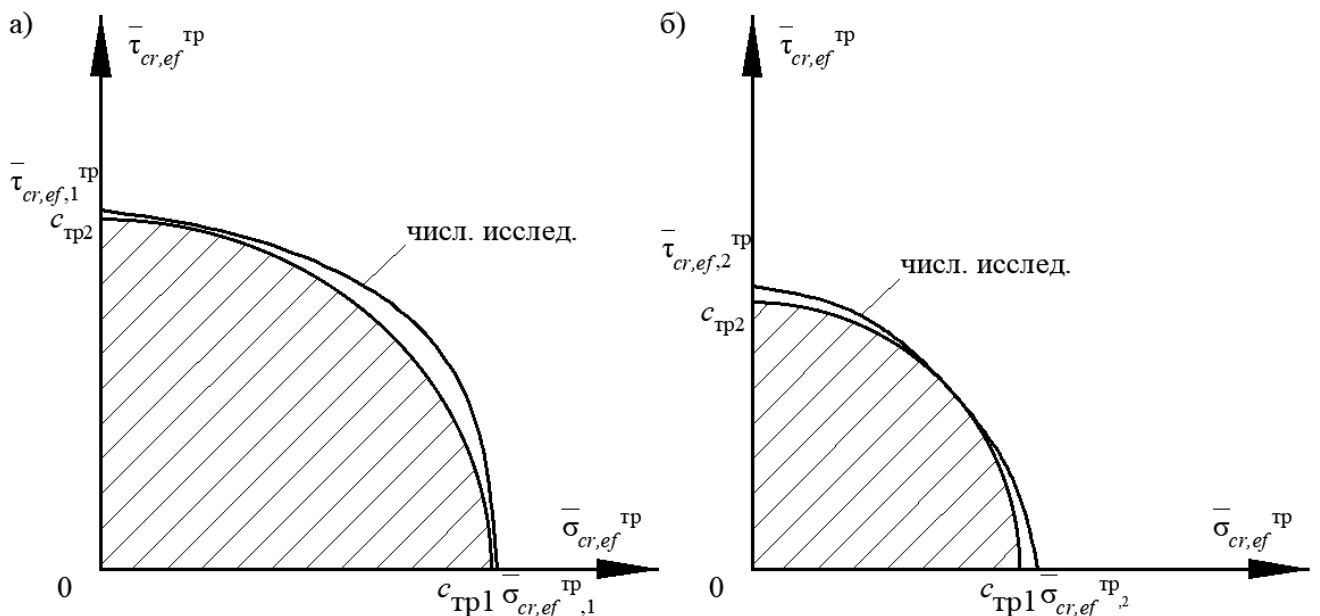


Рисунок 2.26. Схема определения снижающих коэффициентов устойчивости стенок при различных кривизнах областей устойчивости

Таблица 2.13. Коэффициенты, учитывающие снижение расчетных критических напряжений в стенке с трещиной

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной					
	3,94		4,73		5,52	
	$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$	$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$	$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,25	0,951	0,864	0,933	0,888	0,930	0,921
0,50	0,899	0,846	0,898	0,861	0,898	0,913
0,75	0,867	0,803	0,866	0,817	0,865	0,852
1,00	0,865	0,744	0,864	0,772	0,864	0,788

В Таблица 2.14 приведено выборочное сравнение результатов расчетов устойчивости стенки балки с гибкостью $\bar{\lambda}_w = 4,73$ при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы в заданной пропорции усилий.

Таблица 2.14. Сравнение расчетных критических напряжений

$\bar{l}_{тр}$	МКЭ		$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$	$\sigma_{cr,ef}$	$\tau_{cr,ef}$	ф. (2.13), (2.14)		Расхождение
	$\sigma_{cr,ef}^{тр}$	$\tau_{cr,ef}^{тр}$					$\sigma_{cr,ef}^{тр}$	$\tau_{cr,ef}^{тр}$	
0,25	37,48	6,46	0,933	0,888	39,14	6,75	36,51	5,99	2,58%
0,50	35,17	6,07	0,898	0,861	39,14	6,75	35,14	5,81	0,08%
0,75	34,12	5,88	0,866	0,817	39,14	6,75	33,89	5,51	0,66%
1,00	33,83	5,83	0,864	0,772	39,14	6,75	33,85	5,21	0,05%

Видно, что расчетные критические напряжения, вычисленные по формулам (2.13) и (2.14) при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы, хорошо согласуются с результатами расчета методом конечных элементов, что говорит о корректности применения формул.

Инженерная методика расчета устойчивости стенки подкрановых балок с трещинами и пример расчета такой балки приведен в п. 3. 2.

2. 6. Выводы по второй главе

1. Разработаны численная модель и метод расчета подкрановой балки с горизонтальной усталостной трещиной в стенке, позволяющие определить ее напряженно-деформированное состояние и запредельное поведение поврежденной стенки. При этом учитывалось влияние изначальных геометрических несовершенств балки.

2. Предложена методика определения местной устойчивости поврежденной стенки подкрановой балки при действии изгибающего момента и поперечной силы. Получены новые результаты в виде зависимостей относительных расчетных критических напряжений стенки от ее условной гибкости, длины и положения трещины в отсеке.

3. Проведен анализ влияния трещины на снижение расчетных критических параметров устойчивости стенки. Критические нормальные напряжения $\bar{\sigma}_{cr,ef}^{тр}$ снижаются от 3,5% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$, до 8,5% с $\bar{l}_{тр} = 1,00$, а критические касательные напряжения $\bar{\tau}_{cr,ef}^{тр}$ соответственно снижаются от 13,5% до 22,7%. При этом развитие трещины сопровождается перераспределением напряжений в стенке, приводящем к увеличению усилий в сжатом поясе.

ГЛАВА 3. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В СТЕНКЕ

Разработан алгоритм определения несущей способности сварных подкрановых балок с трещинами в стенке при действии изгибающего момента и поперечной силы с учетом геометрических несовершенств. Произведено исследование снижения несущей способности поврежденных балок в зависимости от различных варьируемых параметров.

Разработана инженерная методика расчета подкрановых балок с трещинами на прочность. Предложены методика определения предельной длины трещины и рекомендации по определению срока временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок.

3. 1. Влияние трещин на несущую способность подкрановых балок

При появлении и развитии трещин в зоне сжатого пояса напряженно-деформированное состояние подкрановых балок изменяется, часть стенки становится менее загруженной, происходит перераспределение воспринимаемых усилий внутри поврежденного отсека, что, в свою очередь, приводит к изменению работы всей балки. Кроме того, как отмечалось в п. 2. 1-2. 2, на изменение напряженно-деформированного состояния балки с трещиной также влияют несовершенства, значения которых, как показала практика эксплуатации [22], во многих случаях превышают нормативные допуски на стальные конструкции [25]. В данной главе исследуется влияние горизонтальных усталостных трещин на несущую способность поврежденных подкрановых балок с учетом изначальных геометрических несовершенств при различных силовых воздействиях.

Качественное и количественное изменение напряженно-деформированного состояния подкрановых балок с усталостными трещинами определялось при помощи метода конечных элементов с использованием конечно-элементного программного комплекса ANSYS Workbench. Расчетная модель балки и принцип

приложения нагрузок соответствуют изложенному в п. 2. 1. Абсолютные числовые значения нагрузки подбирались таким образом, чтобы не наступало предельное состояние в виде потери местной устойчивости стенки. Общий алгоритм определения напряженно-деформированного состояния подкрановых балок с усталостными трещинами приведен в п. 2. 2.

На первом этапе задаются начальные геометрические несовершенства, имеющие место в подкрановых балках с трещинами. В настоящей главе исследование несущей способности балок с трещинами определяется с учетом дополнительного влияния следующих видов геометрических несовершенств:

- несовершенства стенки в виде местных выпучиваний стенки. Принимаются по первым формам потери местной устойчивости стенки, полученных в результате решения бифуркационных задач устойчивости (см. п. 2.2 – 2.4);
- геометрические несовершенства сжатого пояса в виде погибей и локальных деформаций в зоне трещины с сопутствующим отрывом от стенки (см. Рисунок 3.1).

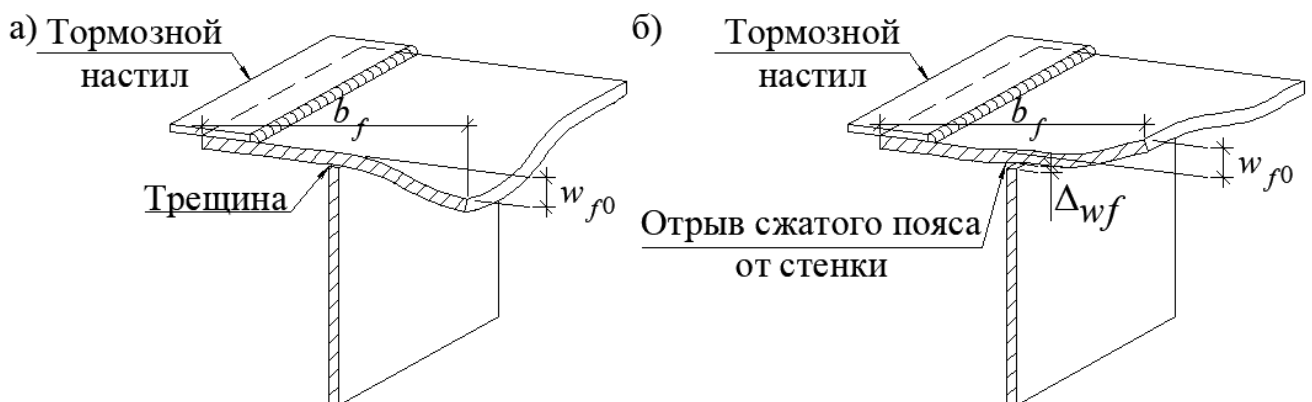


Рисунок 3.1. Начальные геометрические несовершенства сжатого пояса: а) местная погибь со стороны крана; б) отрыв от стенки в зоне трещины с сопутствующей погибью

Задание первого типа несовершенств проводилось аналогично с расчетом местной устойчивости поврежденной стенки через связку расчетных модулей «Static Structural – Eigenvalue Buckling». Второй тип несовершенств задавался в модуле Static Structural: моделировалась идеализированная (без несовершенств) расчетная схема подкрановой балки с трещиной, на которую накладывалось перемещение сжатого пояса (Nodal Displacement), соответствующие принятым

геометрическим отклонениям. Значения геометрических отклонений приведены в п. 2. 2.

На втором этапе решалась деформационная задача с заданными начальными геометрическими несовершенствами, количество шагов расчета – 100. После последнего шага загрузки (при одинаковой суммарной нагрузке) для всех типов балок с трещинами и без них в сечении, соответствующем середине трещины, фиксировались средние нормальные напряжения в сжатом поясе и максимальные касательные в стенке. Далее проводился сравнительный анализ влияния трещин на напряженно-деформированное состояние подкрановой балки.

Алгоритм определения напряженно-деформированного состояния поврежденной подкрановой балки с учетом геометрических несовершенств приводился на блок-схеме Рисунка 2.13.

Исследуем влияние трещин на изменение несущей способности подкрановых балок с усталостными трещинами при различных силовых воздействиях.

3. 1. 1. Несущая способность сжатого пояса при чистом изгибе

Известно, что на восприятие изгибающего момента (M) в балках двутаврового сечения работают стенка и пояса, при этом последние суммарно воспринимают 70-80% действующего усилия. При возникновении и развитии трещины, как это уже упоминалось, напряженно-деформированное состояние поврежденного отсека изменяется. Исследуем качественное изменение возникающих нормальных напряжений при чистом изгибе в отсеке с трещиной $\bar{l}_{тр} = 0,50$. Для этого проведем расчет балки с трещиной и без нее и сравним распределение нормальных напряжений в рассматриваемых отсеках. Изополя нормальных напряжений показаны на Рисунке 3.2, где синий цвет соответствует максимальным сжимающим нормальным напряжениям, красный – растягивающим.

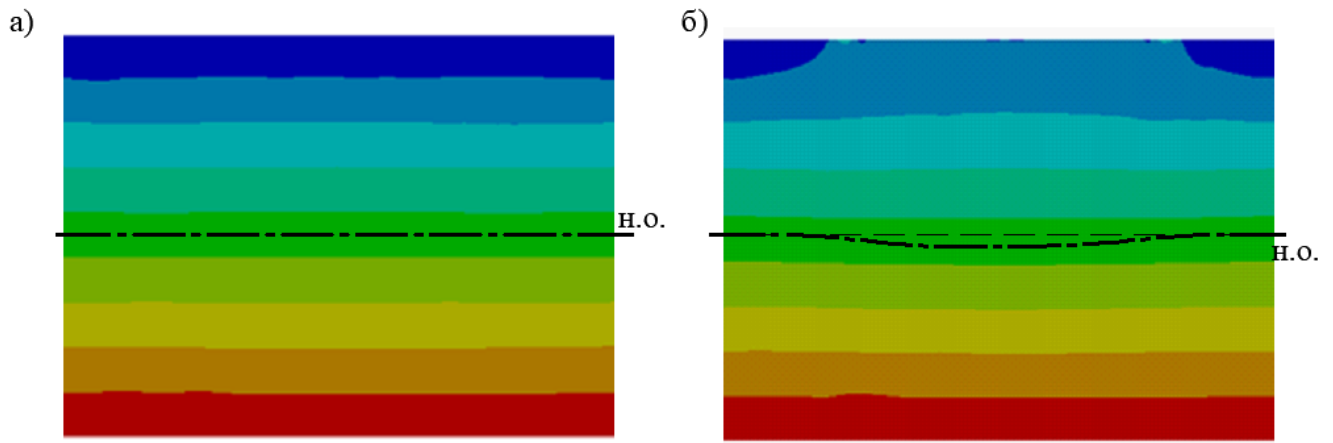


Рисунок 3.2. Нормальные напряжения в подкрановой балке при чистом изгибе: а) без трещины; б) с трещиной

Видно, что изополя напряжений в балке без трещины соответствуют теоретическим предпосылкам (напряжения изменяются равномерно по всей высоте и длине стенки), в отсеке с трещиной напряжения в стенке перераспределяются, что приводит к изменению усилий в поясах. При этом центр тяжести сечения в зоне трещины смещается в сторону растянутого пояса, что, в свою очередь, приводит к увеличению напряжений в сжатом поясе. По мере удаления от вершин трещины нормальные напряжения в поперечных сечениях стабилизируются и в соседних отсеках приходят в соответствие с напряжениями, возникающими в балке без трещины. Характерная эпюра действующих нормальных напряжений, соответствующих сечению в середине трещины, приведена на Рисунке 3.3а, где x_0 – горизонтальная ось центра тяжести сечения без трещины, $y_{ц.т.}$ – величина смещения центра тяжести.

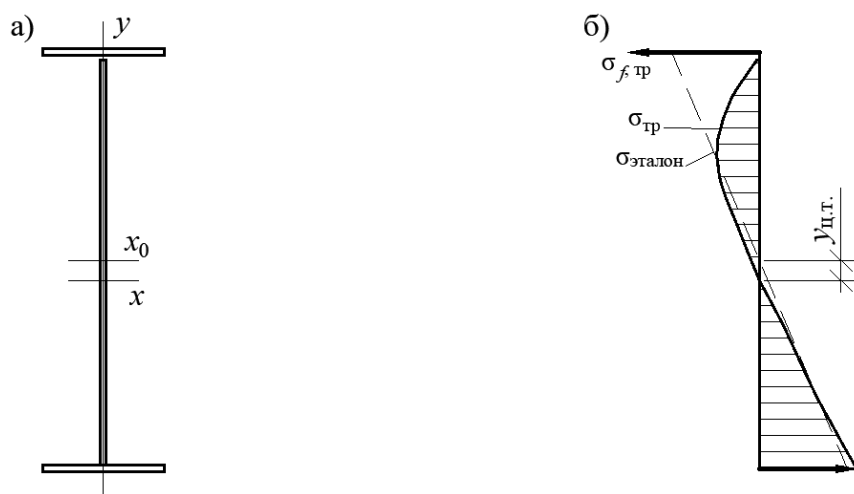


Рисунок 3.3. Нормальные напряжения в балке с трещиной в стенке: а) сечение с трещиной; б) эпюра напряжений

Определим изменение воспринимаемых усилий в поврежденном сечении при появлении и развитии трещины. На графике Рисунка 3.4б показано возрастание усилий в поясах по мере увеличения длины трещины, с сопутствующим уменьшением изгибающего момента, воспринимаемого стенкой с условной гибкостью $\bar{\lambda}_{w,тр} = 4,73$ (среднее значение гибкости стенки проектируемых подкрановых балок).

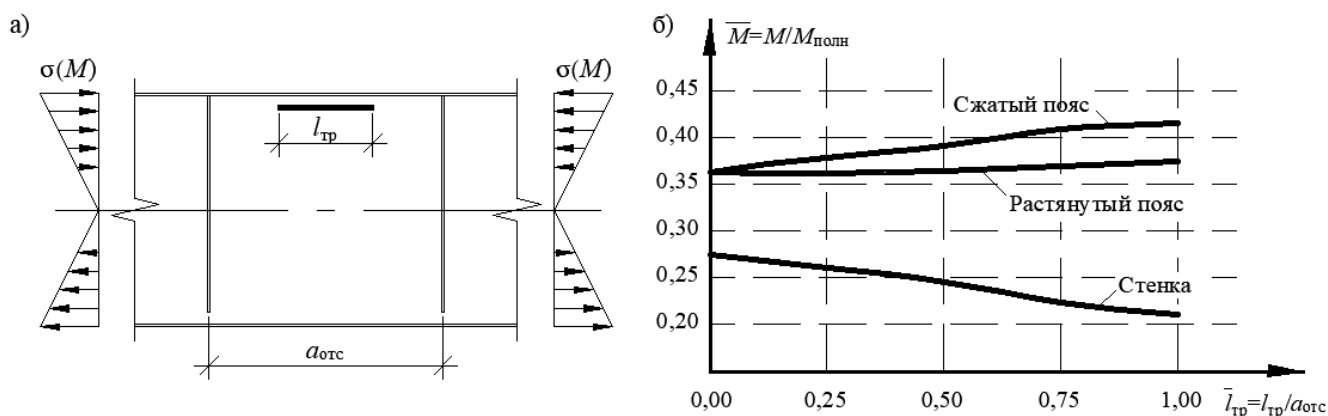


Рисунок 3.4. Изменение воспринимаемых усилий в элементах балки с трещиной в стенке: а) схема нагружения; б) зависимости увеличения воспринимаемых усилий в элементах

Решение задачи показало, что в сечении балки без трещины сжатый и растянутый пояса воспринимают равные части изгибающего моментов, что соответствует теоретическим положениям, при появлении трещины ослабление стенки усталостной трещиной приводит к весьма существенной перегрузке сжатого пояса. Усилие в сжатом поясе возрастает до 15%, в растянутом до 5%, а воспринимаемый стенкой момент уменьшается до 20% от первоначального. Таким образом можно заключить, что общая несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами при чистом изгибе в большей степени характеризуется несущей способностью сжатого пояса.

На первом этапе оценим влияние трещин на увеличение напряжений в сжатом поясе из предположения его полной работы при действии изгибающих моментов с учетом несовершенств в виде местных выпучиваний стенки, как наиболее существенно влияющих на ослабление сечения. На графиках Рисунка 3.5 приведены зависимости увеличения средних напряжений в сжатом поясе от длины трещины при различном ее положении в отсеке. Для наглядности представления

влияния длины трещины на рост напряжений, зависимости приведены в относительных параметрах $\bar{\sigma}_{f,тр} = \sigma_{f,тр} / \sigma_f$, где σ_f – напряжения в сжатом поясе балки без трещины со стенкой со средней условной гибкостью подкрановых балок $\bar{\lambda}_{w,тр} = 4,73$.

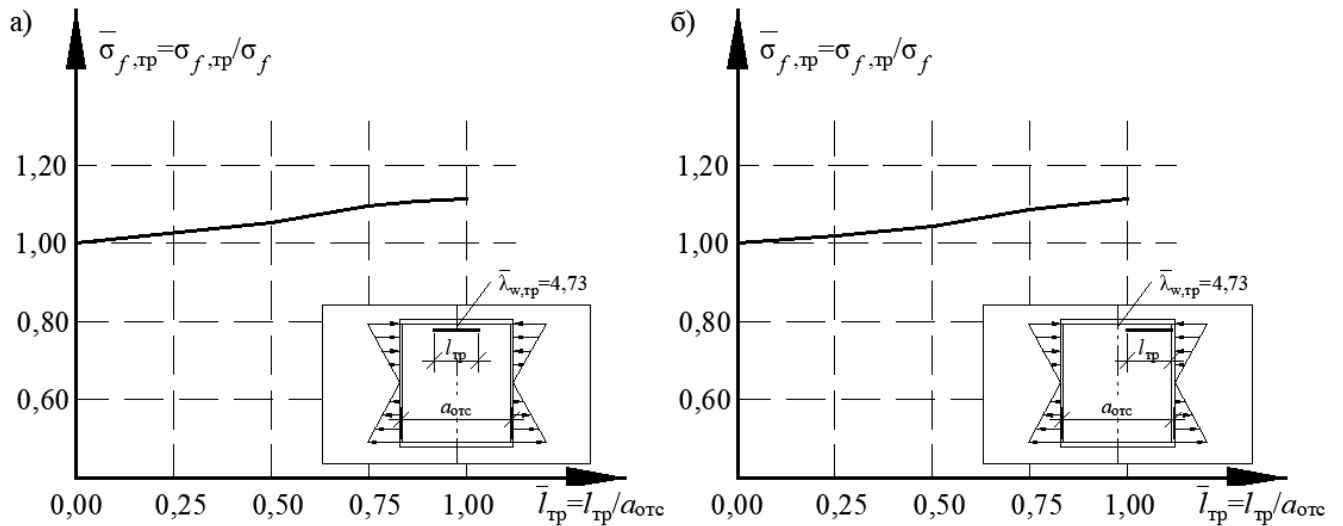


Рисунок 3.5. Зависимости нормальных напряжений в поясе при чистом изгибе с трещиной:
а) посередине отсека; б) у ребра жесткости

В Таблице 3.1 показано возрастание относительных нормальных напряжений в сжатом поясе $\bar{\sigma}_{f,тр}$ в зависимости от условной гибкости стенки и длины трещины. В числителе приведены относительные напряжения при положении трещины посередине отсека, в знаменателе – у ребра жесткости.

Таблица 3.1. Относительные нормальные напряжения в сжатом поясе при наличии трещины с учетом геометрических несовершенств стенки

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $\bar{\sigma}_{f,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,25	$\frac{1,044}{1,037}$	$\frac{1,060}{1,041}$	$\frac{1,085}{1,045}$
0,50	$\frac{1,063}{1,052}$	$\frac{1,083}{1,065}$	$\frac{1,106}{1,080}$
0,75	$\frac{1,106}{1,095}$	$\frac{1,135}{1,117}$	$\frac{1,159}{1,139}$
1,00	1,122	1,152	1,174

Видно, что появление и развитие усталостных трещин в стенке приводит к значительному увеличению напряжений в сжатом поясе, при трещине длиной $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,50$ до 8%, при $\bar{l}_{\text{тр}} = 1,00$ до 17.4%.

Следует заметить, что геометрические несовершенства сжатого пояса и несовершенства крепления рельса также могут приводить к некоторому увеличению усилий. На втором этапе определялось влияние несовершенства крепления рельса и геометрических несовершенств сжатого пояса на увеличение в нем усилий. Указанные несовершенства имеют следующие величины отклонений:

- при местной погиби сжатого пояса (см. Рисунок 3.1а) его отклонения по вертикали $w_{f0} = 0,02b_f$.
- отрыв сжатого пояса от стенки на $\Delta_{wf} = 1,5 \text{ мм} / 1 \text{ п. м}$ [79, 85], чему также сопутствует его местная погибь (см. Рисунок 3.1б). Эти несовершенства будем принимать в сочетании с возможным отклонением рельса по вертикали, вызывающим дополнительную деформацию пояса в зоне трещины;

В Таблицах 3.2 – 3.3 приведены зависимости средних напряжений сжатого пояса в зависимости от типа несовершенства, условной гибкости стенки, длины трещины и ее положения в отсеке. Результаты также приведены в относительных напряжениях $\bar{\sigma}_{f,\text{тр}} = \sigma_{f,\text{тр}} / \sigma_f$ (σ_f – напряжения в сжатом поясе балки без трещины соответствующей гибкости). В числителе приведены относительные напряжения при положении трещины посередине отсека, в знаменателе – у ребра жесткости.

Таблица 3.2. Зависимости средних напряжений в сжатом поясе с учетом отрыва от стенки

$\bar{l}_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} / a_{\text{отс}}$	Значения $\bar{\sigma}_{f,\text{тр}}$ при $\bar{\lambda}_{w,\text{тр}}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,25	$\frac{1,032}{1,035}$	$\frac{1,031}{1,033}$	$\frac{1,025}{1,027}$
0,50	$\frac{1,019}{1,020}$	$\frac{1,019}{1,020}$	$\frac{1,019}{1,020}$
0,75	$\frac{1,021}{1,022}$	$\frac{1,022}{1,021}$	$\frac{1,021}{1,021}$
1,00	1,019	1,024	1,023

Таблица 3.3. Зависимости средних напряжений в сжатом поясе с учетом местной погиби

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $\bar{\sigma}_{f,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,25	$\frac{1,042}{1,042}$	$\frac{1,040}{1,042}$	$\frac{1,033}{1,036}$
0,50	$\frac{1,040}{1,042}$	$\frac{1,040}{1,041}$	$\frac{1,041}{1,042}$
0,75	$\frac{1,051}{1,052}$	$\frac{1,051}{1,051}$	$\frac{1,050}{1,051}$
1,00	1,075	1,066	1,062

Из Таблиц 3.2 – 3.3 видно, что уровень средних нормальных напряжений в сжатом поясе возрастает до 7,5% (длина трещины $\bar{l}_{тр} = 1,00$). При этом положение трещины и гибкость стенки практически не влияют на изменение напряжений. Последнее дает возможность свести полученные результаты в одну Таблицу 3.4 в зависимости только от длины трещины.

Таблица 3.4. Зависимости средних напряжений в сжатом поясе с учетом его несовершенств

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	0,25	0,50	0,75	1,00
$\bar{\sigma}_{f,тр}$	1,042	1,042	1,052	1,075

Следует отметить, что в эксплуатируемых подкрановых балках могут иметь место несовершенства с большими отклонениями, чем указано выше. Необходимо учитывать данный фактор при оценке напряженно-деформированного состояния поврежденной балки. В Таблице 3.5 приведены значения относительных напряжений сжатого пояса при местной погиби $w_{f0} = 0,04b_f$ (в 2 раза больше принимаемых).

Таблица 3.5. Зависимости средних напряжений в сжатом поясе с учетом его несовершенств с повышенными значениями отклонений

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	0,25	0,50	0,75	1,00
$\bar{\sigma}_{f,тр}$	1,079	1,103	1,133	1,184

Возможность использования коэффициентов из Таблиц 3.1, 3.4 и 3.5 при оценке снижения несущей способности сжатого пояса, следует определять после

проведения технического обследования с замером максимальных геометрических отклонений элементов поврежденной подкрановой балки.

3. 1. 2. Несущая способность стенки при чистом сдвиге

Исследуем влияние трещины на напряженно-деформированное состояние балки при действии поперечной силы (Q). В сварных балках двутаврового сечения поперечную силу воспринимает стенка, определим влияние трещины на изменение воспринимаемых усилий с учетом несовершенств в виде местных выпучиваний стенки.

При появлении и развитии трещины, воспринимаемые элементами балки усилия изменяются незначительно, на восприятие поперечной силы продолжает работать только поврежденная стенка. Характерная эпюра действующих касательных напряжений в сечении, соответствующем середине трещины, приведена на Рисуне 3.6б.

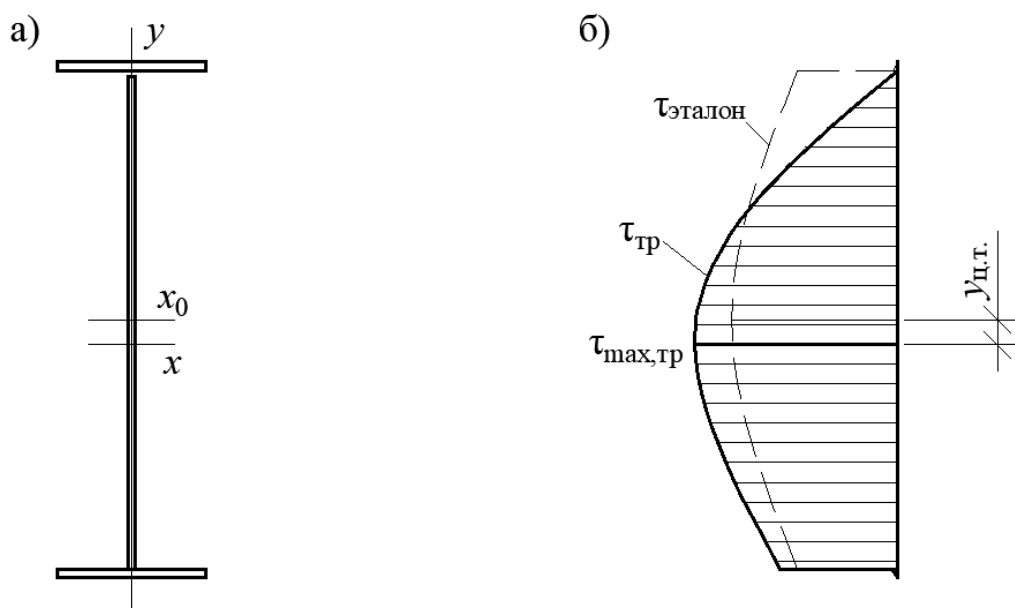


Рисунок 3.6. Касательные напряжения в балке с трещиной в стенке: а) сечение с трещиной; б) эпюра напряжений

На графиках Рисунка 3.7 показаны зависимости увеличения максимальных касательных напряжений в стенке от длины трещины, при различном ее положении в отсеке. Для наглядности, зависимости приведены в относительных параметрах

$\bar{\tau}_{\max, \text{тр}} = \tau_{\max, \text{тр}} / \tau_{\max}$, где $\tau_{\max}$ – максимальные касательные напряжения в стенке

балки без трещины с условной гибкостью $\bar{\lambda}_{w, \text{тр}} = 4,73$.

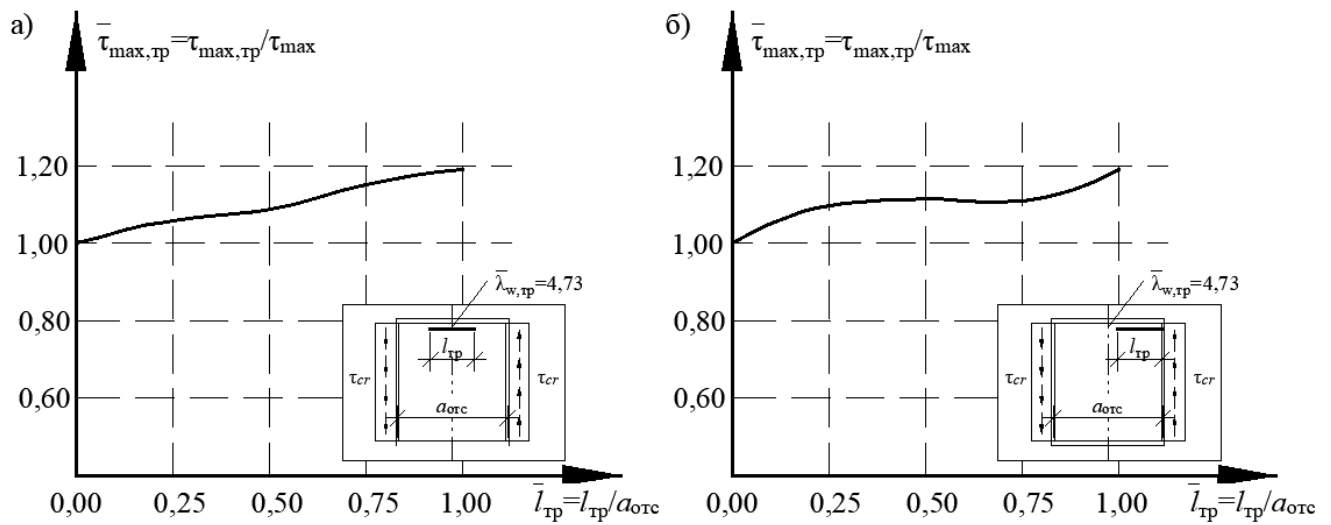


Рисунок 3.7. Зависимости уровня максимальных касательных напряжений в стенке при чистом сдвиге: а) с трещиной в середине отсека; б) с трещиной у поперечного ребра жесткости

Из Рисунка 3.7 следует, что по мере увеличения длины трещины касательные напряжения существенно увеличиваются. Более показательно изменение уровня максимальных касательных напряжений в стенке приведено в Таблице 3.6, в которой относительные напряжения $\bar{\tau}_{\max, \text{тр}}$ определены в зависимости от условной гибкости стенки и длины трещины (в числителе относительные напряжения при положении трещины посередине отсека, в знаменателе – у ребра жесткости).

Таблица 3.6. Относительные максимальные касательные напряжения в стенке с трещиной

$\bar{l}_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} / a_{\text{отс}}$	Значения $\bar{\tau}_{\max, \text{тр}}$ при $\bar{\lambda}_{w, \text{тр}}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,25	$\frac{1,063}{1,106}$	$\frac{1,063}{1,138}$	$\frac{1,053}{1,162}$
0,50	$\frac{1,101}{1,110}$	$\frac{1,082}{1,125}$	$\frac{1,075}{1,170}$
0,75	$\frac{1,165}{1,149}$	$\frac{1,140}{1,113}$	$\frac{1,126}{1,113}$
1,00	1,207	1,190	1,179

Видно, что с появлением и развитием усталостных трещин в стенке при действии поперечных сил значительно возрастает уровень максимальных касательных напряжений до 17% при $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,50$, до 21% при $\bar{l}_{\text{тр}} = 1,00$.

3. 1. 3. Влияние трещин на изменение напряженно-деформированного состояния подкрановых балок при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Оценим влияние трещин на изменение напряженно-деформированного состояния поврежденных подкрановых балок при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы. Проведем выборочные исследования подкрановых балок со стенкой средней гибкости ($\bar{\lambda}_w = 4,73$) с учетом ее геометрических несовершенств в виде местных выпучиваний при различных пропорциях M и Q . На Рисунке 3.8 показано возрастание средних нормальных напряжений в сжатом поясе и максимальных касательных напряжений в стенке с учетом дополнительного влияния соответственно поперечной силы и изгибающего момента в зависимости от длины трещины. В табличной форме результаты исследований сведены в Таблицах 3.7 – 3.8.

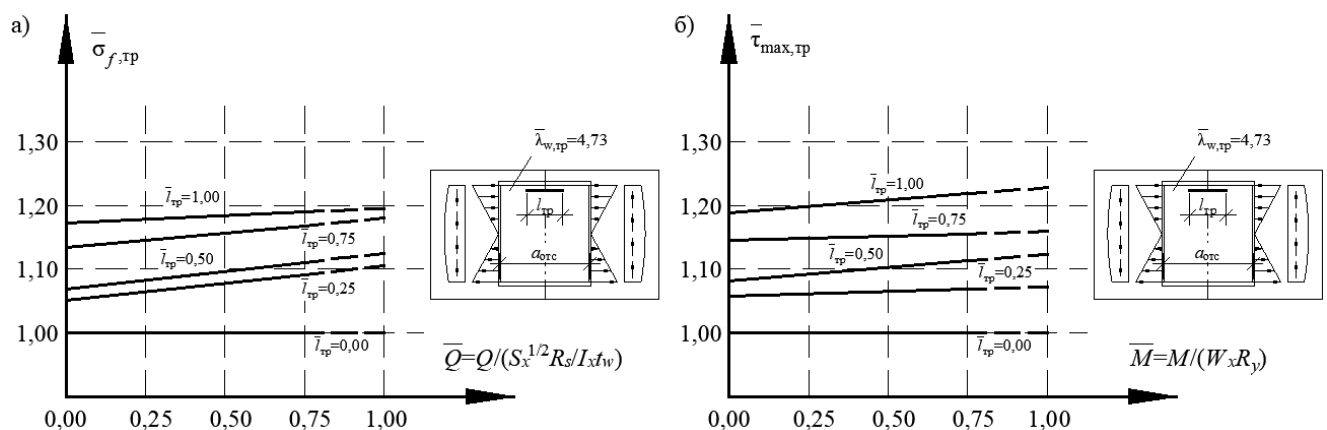


Рисунок 3.8. Зависимости: а) средних нормальных напряжений в сжатом поясе; б) уровня максимальных касательных напряжений в стенке

Таблица 3.7. Зависимости средних напряжений в сжатом поясе при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

$\bar{Q} = Q / (S_x^{1/2} R_s / I_x t_w)$	$\bar{\sigma}_{f,тр}$ при $\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$			
	0,25	0,50	0,75	1,00
0,00	1,060	1,083	1,135	1,152
0,25	1,071	1,092	1,144	1,161
0,50	1,083	1,100	1,154	1,171
0,75	1,095	1,109	1,163	1,181
1,00	1,106	1,117	1,173	1,191

Таблица 3.8. Зависимости максимальных касательных напряжений в стенке при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

$\bar{M} = M / (W_x R_y)$	$\bar{\tau}_{max,тр}$ при $\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$			
	0,25	0,50	0,75	1,00
0,00	1,063	1,082	1,140	1,190
0,25	1,065	1,090	1,145	1,197
0,50	1,067	1,098	1,151	1,204
0,75	1,070	1,106	1,156	1,212
1,00	1,072	1,114	1,161	1,219

Как видно из Рисунка 3.8 и Таблицы 3.7 зависимости увеличения напряжений $\bar{\sigma}_{f,тр}$ и $\bar{\tau}_{max,тр}$ – линейные, увеличение нормальных напряжений в сжатом поясе до +4,4%, максимальных касательных в стенке до +3%, что необходимо учитывать при оценке напряженно-деформированного состояния поврежденных балок.

3. 2. Инженерная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке

В практическом применении для оценки снижения несущей способности подкрановой балки и устойчивости стенки при комплексном действии усилий M_x , M_y и Q предлагается использовать формулы (42), (43) и (80) действующих норм проектирования СП 16.13330 с введением понижающих коэффициентов влияния трещины. Тогда проверки прочности поврежденной подкрановой балки приобретают вид:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x \leq 1; \quad (3.1)$$

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} \leq 1; \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr,ef}^{тр}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr,ef}^{тр}} \right)^2} = \frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{1,тр} \sigma_{cr,ef}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{2,тр} \tau_{cr,ef}} \right)^2} \leq 1, \quad (3.3)$$

где $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$ – коэффициенты, которые учитывают влияние трещины на перераспределение напряжений в балке; $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ – коэффициенты влияния трещины на устойчивость стенки и зависящие от относительной длины трещины $\bar{l}_{тр}$, ее положения в отсеке и гибкости стенки $\bar{\lambda}_{w,тр}$. Во формулах (3.1)-(3.3) геометрические параметры сечений и значения сопротивлений стали принимаются как для целых балок без трещины. При этом следует заметить, что понижающие коэффициенты в (3.1) – (3.2) показывают фактическое снижение несущей способности сечения с трещиной, а не геометрических характеристик сечения, и предлагаемые формулы не описывают законы распределения напряжений по высоте сечения (характерные эпюры приводились на Рисунке 3.3 и 3.6).

Коэффициенты $c_{f,тр}$ в формуле (3.1) равны произведению обратных значений относительных нормальных напряжений сжатого пояса из Таблиц 3.1 и 3.4 с поправкой на дополнительное влияние поперечных сил $K = 0,95$ (см. п. 3. 1. 3) и

приведены в Таблице 3.9, $c_{w,тр}$ из формулы (3.2) – обратные значения относительных максимальных касательных напряжений (см. Таблицу 3.6) также с поправкой на дополнительное влияние изгибающих моментов $K = 0,95$ и сведены в Таблицу 3.10. В числителе таблиц приведены понижающие коэффициенты при положении трещины посередине отсека, в знаменателе – у ребра жесткости. Следует отметить, что в Таблице 3.9 показаны $c_{f,тр}$, полученные при значениях отклонений геометрических несовершенств сжатого пояса $w_{f0} = 0,02b_f$ [106], которые имеют место при эксплуатации подкрановых балок. В случае превышения указанных значений $c_{f,тр}$ подлежат корректировке.

Таблица 3.9. Значения понижающих коэффициентов влияния трещины $c_{f,тр}$

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $c_{f,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,00	1,000	1,000	1,000
0,25	$\frac{0,873}{0,880}$	$\frac{0,861}{0,876}$	$\frac{0,841}{0,873}$
0,50	$\frac{0,857}{0,866}$	$\frac{0,841}{0,856}$	$\frac{0,824}{0,844}$
0,75	$\frac{0,817}{0,825}$	$\frac{0,796}{0,809}$	$\frac{0,780}{0,793}$
1,00	0,788	0,768	0,753

Таблица 3.10. Значения понижающих коэффициентов влияния трещины $c_{w,тр}$

$\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Значения $c_{w,тр}$ при $\bar{\lambda}_{w,тр}$, равной		
	3,94	4,73	5,52
0,00	1,000	1,000	1,000
0,25	$\frac{0,894}{0,859}$	$\frac{0,894}{0,835}$	$\frac{0,902}{0,818}$
0,50	$\frac{0,863}{0,856}$	$\frac{0,878}{0,834}$	$\frac{0,884}{0,812}$
0,75	$\frac{0,815}{0,827}$	$\frac{0,833}{0,819}$	$\frac{0,844}{0,811}$
1,00	0,787	0,798	0,806

Для оценки справедливости перемножения относительных параметров напряжений $\bar{\sigma}_{f,тр}$ при вычислении $c_{f,тр}$ из формулы (3.1) были проведены

выборочные численные исследования (гибкость стенки $\bar{\lambda}_{w,тр} = 4,73$) при одновременном учете геометрических несовершенств в виде погиби сжатого пояса ($w_{p0} = 0,02b_f$) и выпучивания стенки в зоне усталостной трещины по алгоритму приведенному в п. 2. 2. Результаты исследований сведены в Таблицу 3.11. Во втором и третьем столбцах приведены значения $1/\bar{\sigma}_{f,тр}$, обратные относительным параметрам напряжений из соответственно Таблиц 3.1 и 3.4, в четвертом приведено произведение обратных значений указанных коэффициентов $c_{f,тр}$, в пятом – $c_{f,МКЭ}$, полученные по результатам расчетов МКЭ при одновременном влиянии указанных несовершенств.

Таблица 3.11. Таблица сравнения совместного влияния геометрических несовершенств поврежденной стенки и сжатого пояса на прочность балки

Относительная длина трещины $\bar{l}_{тр} = l_{тр} / a_{отс}$	Несовершенство стенки $1/\bar{\sigma}_{f,тр(ст)}$	Несовершенство пояса $1/\bar{\sigma}_{f,тр(п)}$	Произведение $c_{f,тр}$	Совместное влияние несовершенств $c_{f,МКЭ}$	Расхождение $\frac{c_{f,МКЭ} - c_{f,несов} c_{f,тр}}{c_{f,МКЭ}} 100\%$
0,25	0,944	0,960	0,906	0,948	4,5%
0,50	0,923	0,959	0,886	0,918	3,5%
0,75	0,881	0,951	0,838	0,861	2,7%
1,00	0,868	0,931	0,808	0,823	1,9%

Из Таблицы 3.11 видно, что произведение $1/\bar{\sigma}_{f,тр(ст)}$ и $1/\bar{\sigma}_{f,тр(п)}$ (равное $c_{f,тр}$), отдельно учитывающих несовершенства пояса и стенки, хорошо согласуется с $c_{f,МКЭ}$, расхождение не превышает 4,5%.

Основным элементом, определяющим несущую способность подкрановых балок с трещинами, является сжатый пояс, на графиках Рисунок 3.9 показано снижение его несущей способности в зависимости от длины трещины и гибкости стенки при комплексном учете геометрических несовершенств.

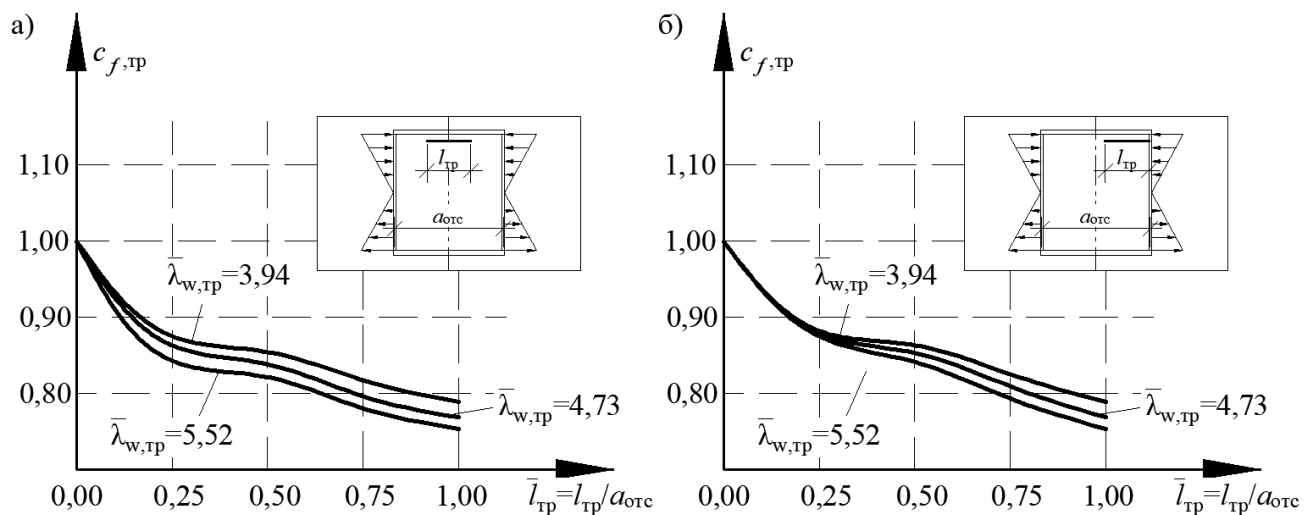


Рисунок 3.9. Снижение прочности подкрановой балки с трещиной при чистом изгибе:
а) посередине отсека; б) у ребра жесткости

При оценке прочности подкрановой балки с усталостной трещиной в стенке в зоне сжатого пояса учитываются следующие расчете положения:

1. Расчетное сечение соответствует геометрической середине трещины.
2. Внутренние усилия определяются при наиболее неблагоприятном положении кранов для рассматриваемого сечения (в запас). Линия влияния строится с учетом возможного технологического ограничения хода кранов.

3. Условная гибкость стенки с трещиной $\bar{\lambda}_{w,тр}$ определяется по формуле:

$$\bar{\lambda}_{w,тр} = \bar{\lambda}_w \sqrt{320 / R_y}, \quad (3.4)$$

где $\bar{\lambda}_w$ вычисляется в соответствии с п. 8.5.1 СП 16 как для целой балки без трещины; R_y – расчетное сопротивление стенки (Н/мм²).

4. Проверка местной устойчивости стенки производится без учета нагрузки от сосредоточенного давления колеса крана.

5. При промежуточных случаях длины трещины, ее положения в отсеке и условной гибкости стенки значения коэффициентов $c_{1,тр}$, $c_{2,тр}$, $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$ определяются интерполяцией по Таблицам 2.8, 3.9 и 3.10, при гибкостях стенки $\bar{\lambda}_{w,тр} < 3,94$ и $\bar{\lambda}_{w,тр} > 5,52$ – экстраполяцией.

6. При развитии трещины в двух отсеках через поперечные ребра жесткости, которые закреплены к сжатому поясу (при отсутствии сплошных трещин в сварных швах, соединяющих верхний пояс и стенку), поверочные расчеты проводят как для двух трещин от ребра. В случаях, когда трещина

проходит через ребра жесткости и они оторваны от сжатого пояса, относительная длина трещины удваивается и может составить больше единицы $\bar{l}_{тр} > 1$. Значения коэффициентов $C_{1,тр}$, $C_{2,тр}$, $C_{f,тр}$, $C_{w,тр}$ в таких случаях находятся экстраполяцией. Следует отметить, что в таких балках целесообразно проведение восстановительных мероприятий, в том числе для обеспечения устойчивости сжатого пояса.

В настоящем исследовании коэффициенты $C_{1,тр}$, $C_{2,тр}$, $C_{f,тр}$ и $C_{w,тр}$ получены для подкрановых балок с двусторонними ребрами жесткости и с одинаковыми характеристиками стали стенки и поясов. Для поврежденных подкрановых балок с односторонними ребрами жесткости и/или бистальных балок потребуются дополнительные проверки применимости формул (3.1) – (3.3).

Пример проверки прочности подкрановой балки с усталостной трещиной

Для проведения поверочных расчетов за основу возьмем типовую сварную подкрановую балку марки Б12-7-4 по серии 1.426.2-7 [96]. Сечение подкрановой балки – сварной неравнополочный двутавр, с полками сечением – 400х14 и – 260х14, стенкой – 1240х10, шаг поперечных ребер жесткости – 1500 мм, балка – разрезная однопролетная длиной 12 м. Стенка и пояса выполнены из стали 09Г2С, с расчетным сопротивлением изгибу при указанных толщинах элементов $R_y = 310$ МПа и расчетным сопротивлением на сдвиг $R_s = 180$ МПа. Принимаем, что пролет оборудован двумя мостовыми кранами с группой режима работы кранов – 7К (тяжелый), грузоподъемностью 32/5 тс, с нормативным вертикальным давлением колес $F_k^n = 275$ кН. База крана 5100 мм, ширина крана 6300 мм. Проведем поверочный расчет балки с усталостной трещиной в стенке длиной 600 мм, находящейся в 6 отсеке, с развитием от поперечного ребра жесткости (см. Рисунок 3.10).

Момент инерции сечения в плоскости балки $I_x = 2166228$ см⁴. Момент инерции из плоскости балки с учетом тормозной конструкции $I_y = 3427365$ см⁴, статический момент сдвигаемой части сечения балки $S = 14140$ см².

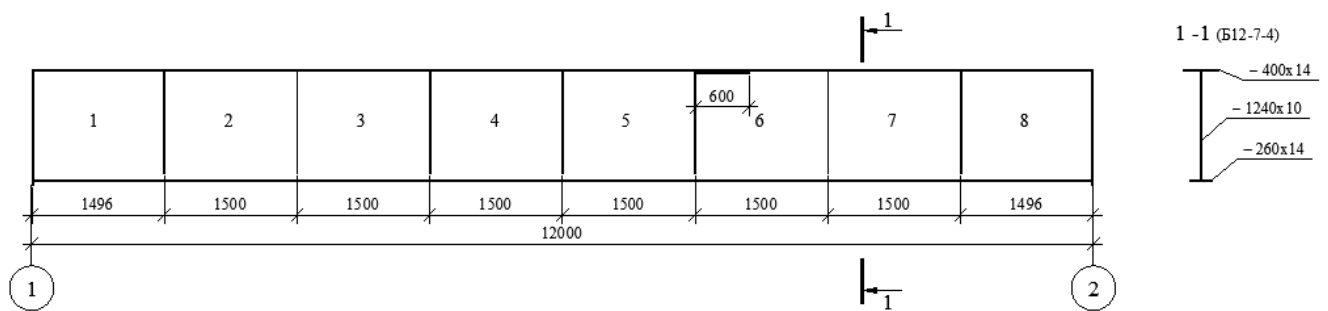


Рисунок 3.10. Схема поврежденной подкрановой балки

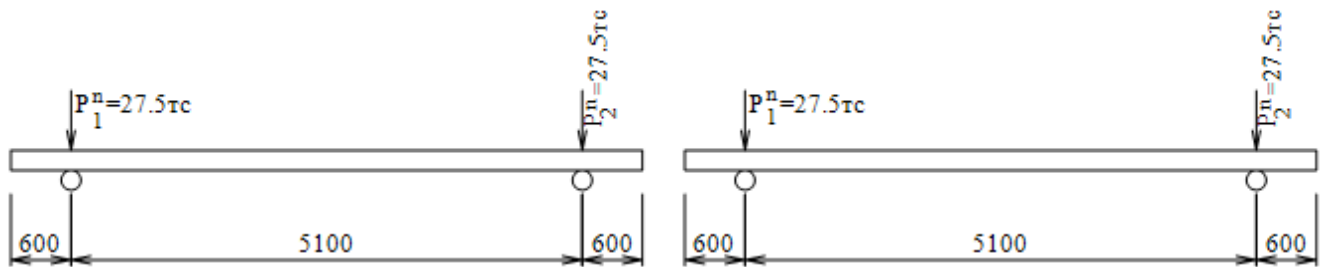


Рисунок 3.11. Схема кранов с нормативными значениями вертикальных давлений колес

Расчетное значение вертикальной силы F_k определяем по формуле:

$$F_k = \alpha \psi K_d \gamma_f F_k^n = 1,05 \cdot 0,95 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 275 = 332 \text{ кН} = 33,2 \text{ тс}, \quad (3.5)$$

где α – коэффициент, учитывающий влияние массы балки; ψ – коэффициент сочетаний (при учете двух кранов для балок групп режимов работы 7К, 8К $\psi = 0,95$); где K_d – коэффициент динамичности; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке.

Построим линии влияния и соответствующие эпюры внутренних усилий (см. Рисунки 3.12 – 3.13) при наиболее неблагоприятном положении кранов для сечения, соответствующего середине трещины (7800 мм от левой опоры).

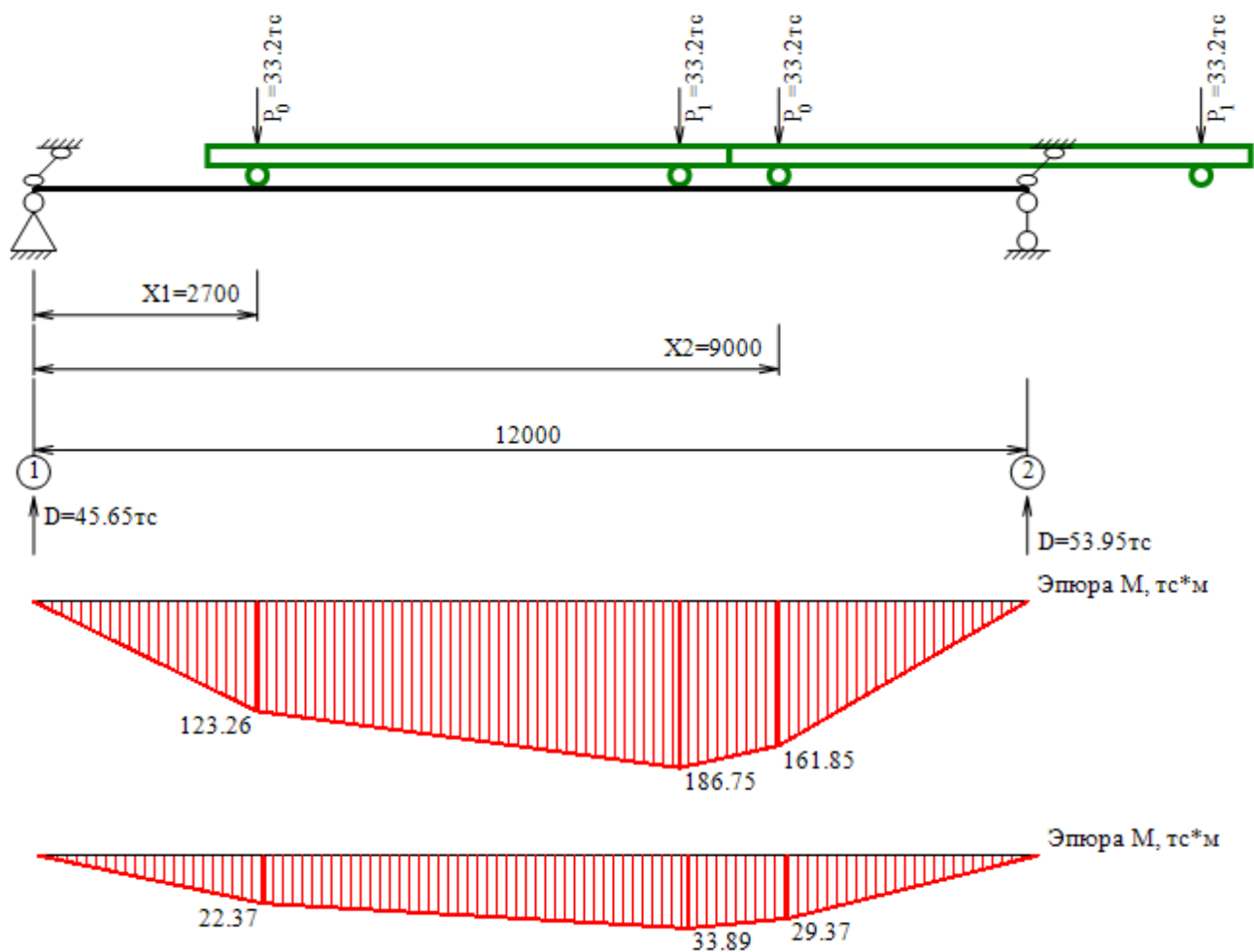


Рисунок 3.12. Эпюра усилий M_x и M_y от вертикальной и горизонтальной нагрузки при расчетном положении кранов

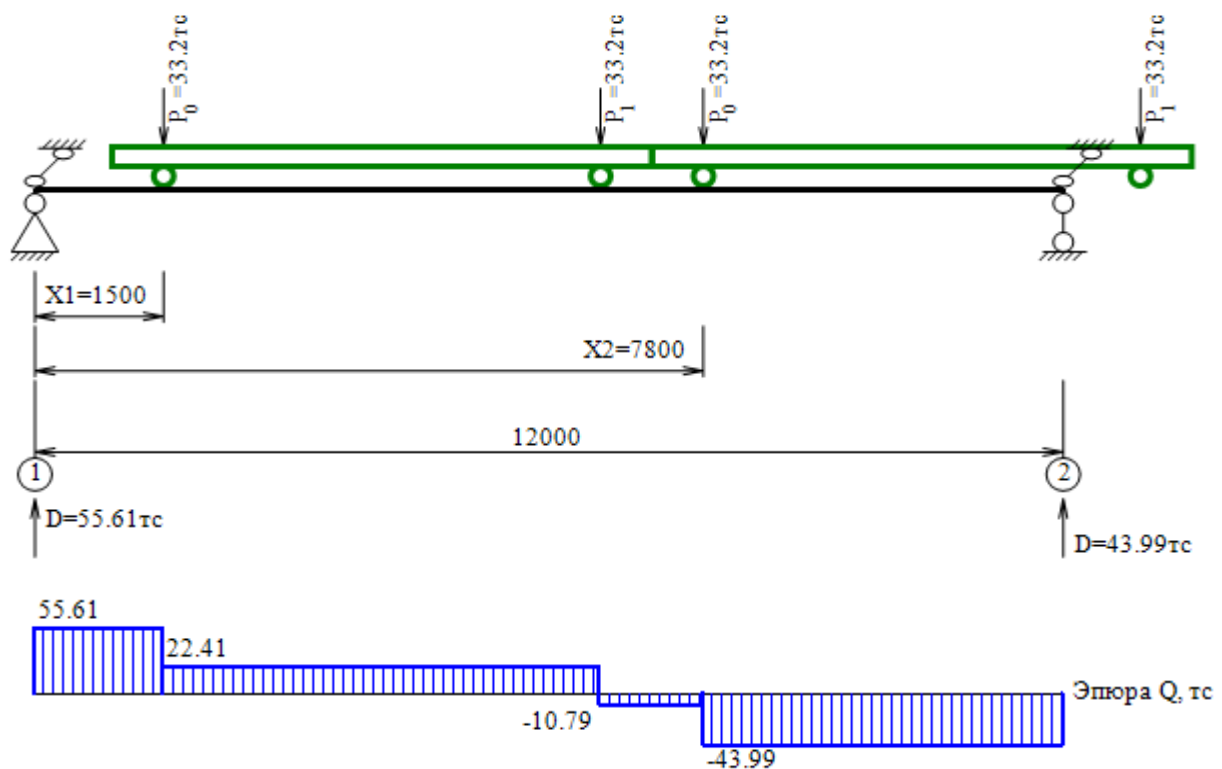


Рисунок 3.13. Эпюра усилий Q от вертикальной нагрузки при расчетном положении кранов

По результатам расчетов значения внутренних усилий в рассматриваемом сечении при наиболее неблагоприятном положении кранов:

– изгибающий момент в плоскости балки $M_x = 186,8 \text{ тсм} = 1831 \text{ кНм}$, соответствующий ему изгибающий момент из плоскости балки $M_y = 33,9 \text{ тсм} = 332 \text{ кНм}$;

– поперечная сила $Q = 44 \text{ тс} = 431,2 \text{ кН}$.

Проведем поверочный расчет сечения с трещиной длиной 600 мм с развитием от ребра жесткости. Вычисляем относительную длину трещины и условные гибкости стенки:

$$\bar{l}_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} / a_{\text{отс}} = 600 / 1500 = 0,400; \quad (3.6)$$

$$\bar{\lambda}_w = (h_{ef} / t_w) \sqrt{R_y / E} = (1240 / 10) \sqrt{310 / 206000} = 4,810; \quad (3.7)$$

$$\bar{\lambda}_{w,\text{тр}} = \bar{\lambda}_w \sqrt{320 / R_y} = 4,810 \sqrt{320 / 310} = 4,873. \quad (3.8)$$

Нормальные и касательные напряжения в стенке, вычисляемые согласно п. 8.5.2 СП 16, по формулам (78), (79):

$$\sigma = M_y / I_x = 1831 \cdot 1000 \cdot 56,3 / 515173 = 200,1 \text{ МПа}; \quad (3.9)$$

$$\tau = Q / (t_w h_w) = 431,2 \cdot 10 / (124 \cdot 1) = 34,8 \text{ МПа}. \quad (3.10)$$

Критические напряжения, вычисляемые по п. 8.5.3 СП 16 как для целой стенки по формулам (81), (83):

$$\sigma_{cr,ef} = c_{cr} R_y / \bar{\lambda}_w^2 = 32,89 \cdot 310 / 4,810^2 = 440,6 \text{ МПа}; \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \tau_{cr,ef} &= 10,3 \left(1 + 0,76 / \mu^2 \right) R_s / \bar{\lambda}_d^2 = 10,3 \left(1 + 0,76 / 1,81^2 \right) 180 / 4,81^2 = \\ &= 121,6 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Интерполяцией в зависимости от $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,400$ (положение – у ребра жесткости) и $\bar{\lambda}_{w,\text{тр}} = 4,873$ определяем из Таблиц 3.9, 3.10 и 2.8 коэффициенты влияния трещины: $c_{f,\text{тр}} = 0,862$, $c_{w,\text{тр}} = 0,831$, $c_{1,\text{тр}} = 0,912$, $c_{2,\text{тр}} = 0,880$. Подставляя вычисленные значения в формулы (3.1), (3.2), (3.3) получаем:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x = \frac{1831 \cdot 1000}{0,862 \cdot 515173 \cdot 310 \cdot 1} \times$$

$$\times 57,7 + \frac{332 \cdot 1000}{381172 \cdot 310 \cdot 1} 57 = 0,927 < 1; \quad (3.13)$$

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} = \frac{431,2 \cdot 4779,2 \cdot 10}{0,831 \cdot 515173 \cdot 1,0 \cdot 180 \cdot 1} = 0,268 < 1, \quad (3.14)$$

следовательно, прочность подкрановой балки с усталостной трещиной по критерию несущей способности сжатого пояса и стенки обеспечена.

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{1,тр} \sigma_{cr,ef}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{2,тр} \tau_{cr,ef}} \right)^2} =$$

$$= \frac{1}{1} \sqrt{\left(\frac{200,1}{0,912 \cdot 440,6} \right)^2 + \left(\frac{34,8}{0,880 \cdot 121,6} \right)^2} = 0,595 < 1, \quad (3.15)$$

следовательно, местная устойчивость стенки обеспечена.

3. 3. Методика определения предельной длины трещины

Временная эксплуатация подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке может быть обоснована до планового ремонта или замены балки при условии обеспечения прочности балки, а именно соблюдении критериев местной устойчивости стенки и сохранения несущей способности сжатого пояса и стенки, При этом в техническом обосновании такой возможности обязательно должны учитываться факторы увеличения длины трещины в процессе эксплуатации и проведения мероприятий по торможению развития трещины, включая усиление балки (подробнее в п. 3. 4).

При расчетной оценке по разработанной инженерной методике определяются коэффициенты использования сечения при выявленной длине трещины, обратным ходом, зная действующие нагрузки и геометрические характеристики балки, при постепенном увеличении трещины в расчетах можно определить ее предельную

длину, при которой может наступить одно или несколько предельных состояний поврежденной подкрановой балки.

Учитывая изложенное, на основании инженерной методики оценки прочности поврежденной подкрановой балки предлагается алгоритм определения предельной длины трещины, приведенный на Рисунок 3.14.

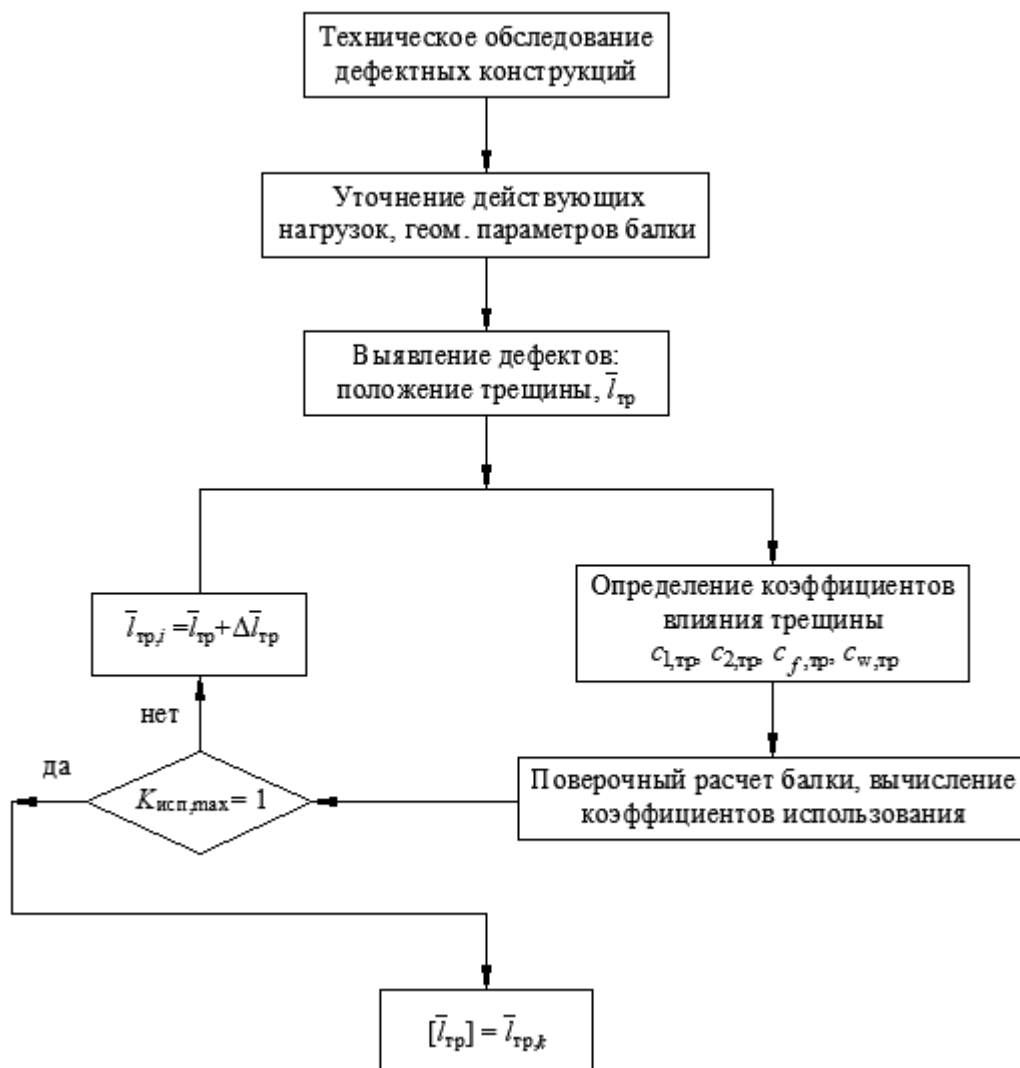


Рисунок 3.14. Алгоритм определения предельной длины трещины

Отметим, что эксплуатация поврежденных подкрановых балок предполагает обязательный контроль за динамикой роста трещины (постановку мониторинга) и при достижении длины, близкой к предельной, балка выводится из работы. Также отметим, что одним из способов продления эксплуатационной пригодности поврежденной балки является проведение мероприятий по торможению развития трещины, в том числе локальных усилений сжатого пояса. Фактические запасы несущей способности подкрановой балки и ее временной ресурс уточняются по

результатам мониторинга после проведения капитального ремонта или замены балки.

Пример определения предельной длины трещины

Для проведения расчетов за основу возьмем ту же балку, для которой проводили оценку прочности в п. 3. 2. Было определено, что при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,400$, расположенной у ребра жесткости, проверки по формулам (3.1), (3.2), (3.3) выполняются, наибольший коэффициент использования наблюдался при проверке прочности балки по нормальным напряжениям сжатого пояса. Постепенно увеличиваем длину трещины и определяем параметр, при котором наступает предельное состояние:

$$\bar{l}_{тр,1} = 0,500.$$

При помощи интерполяции по Таблица 3.9 получаем коэффициент влияния трещины на несущую способность сжатого пояса: $c_{f,тр} = 0,853$.

$$\begin{aligned} \frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x &= \frac{1831 \cdot 1000}{0,853 \cdot 515173 \cdot 310 \cdot 1} \times \\ &\times 57,7 + \frac{332 \cdot 1000}{381172 \cdot 310 \cdot 1} 57 = 0,935 < 1; \end{aligned} \quad (3.16)$$

...

$$\bar{l}_{тр,i} = \dots$$

...

$$\bar{l}_{тр,k} = 0,860.$$

При помощи интерполяции по Таблица 3.9 получаем коэффициент влияния трещины на несущую способность сжатого пояса: $c_{f,тр} = 0,788$.

$$\begin{aligned} \frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x &= \frac{1831 \cdot 1000}{0,788 \cdot 515173 \cdot 310 \cdot 1} \times \\ &\times 57,7 + \frac{332 \cdot 1000}{381172 \cdot 310 \cdot 1} 57 = 1. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Следовательно, при трещине с относительной длиной $[\bar{l}_{\text{тр}}] = 0,860$ в рассматриваемой балке наступит предельное состояние в виде исчерпания несущей способности сжатого пояса, как определяющего прочность рассматриваемой балки в целом. В абсолютной величине длина трещины составит $l_{\text{тр}} = 1290$ мм.

3. 4. Рекомендации по временной эксплуатации подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке

Решение о возможности временной эксплуатации сварных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке принимается на основании результатов мониторинга и технического заключения по результатам обследования поврежденных балок. При этом проверочные расчеты конструкций производятся по разработанной инженерной методике, для каждой трещины определяются критические факторы загрузки ($K_{\text{исп, max}}$) и ее предельная длина ($[\bar{l}_{\text{тр}}]$).

С применением графических зависимостей длины трещины от времени эксплуатации можно произвести оценку остаточного ресурса поврежденных балок [12]. Остаточный ресурс подкрановых балок с трещинами – это время их эксплуатации от даты проведения последнего наблюдения до предполагаемого момента в будущем, когда может наступить предельное состояние, которое характеризуется достижением трещины предельной длины. По результатам наблюдения за развитием трещины устанавливается скорость ее развития, и при помощи экстраполяции определяется срок временной эксплуатации поврежденной балки до ремонта или замены (см. Рисунок 3.15).

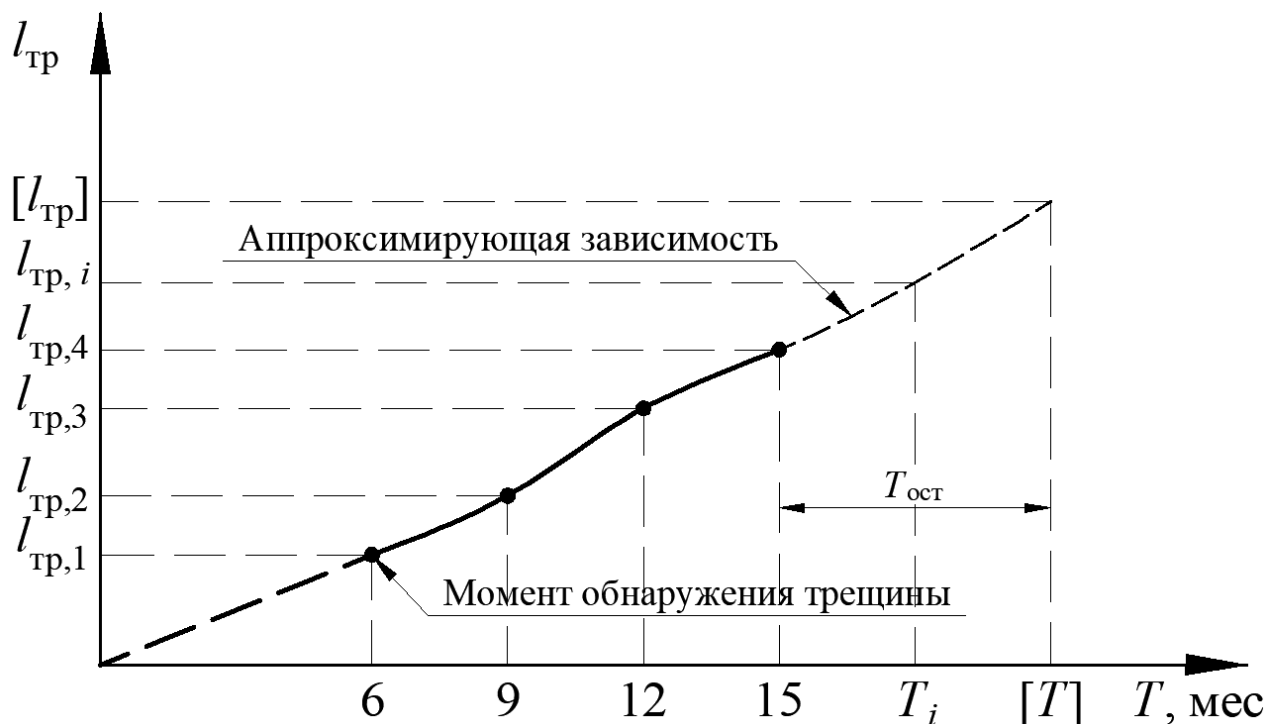


Рисунок 3.15. Определение временного ресурса эксплуатации подкрановой балки с трещиной

Заметим, что на действительную работу подкрановых балок влияет множество эксплуатационных факторов, в том числе дефекты и несовершенства кранов, расстройств узлов крепления и пр., которые изменяют характер их работы, поэтому оценку остаточного ресурса по результатам мониторинга можно дать только приближенно. В зависимости от количества точек (результатов наблюдений за длиной трещины), принятых для построения графиков, вводятся дополнительные коэффициенты запаса, учитывающие рост неопределенности при увеличении остаточного ресурса. Помимо определения сроков временной эксплуатации, предлагаемая методика позволяет выделить самые опасные участки подкрановых балок с трещинами, у которых остаточный ресурс – минимален, и упростить формирование очередности ремонта или замены поврежденных конструкций.

Также следует заметить, что одним из способов продления временного ресурса поврежденных подкрановых балок является их усиление в комплексе с мероприятиями по торможению развития трещин. Подробное описание методов замедления скорости роста усталостных трещин приводилось в п. 1. 3, среди них выделяются следующие группы [106]:

1. Эксплуатационно-технический.
2. Технологический.
3. Конструктивный.
4. Комбинированный. Наиболее эффективный способ торможения развития усталостных трещин.

Одним из путей развития настоящего исследования может являться разработка рекомендаций по эффективному усилению элементов поврежденных подкрановых балок (с обоснованием расчетными моделями) [84], в частности перегруженного сжатого пояса, в сочетании с проведением мероприятий по торможению скорости роста усталостных трещин в стенке, которые могут быть оставлены при дальнейшей эксплуатации конструкций.

Пример расчета усиленной подкрановой балки с трещиной

Рассмотрим пример усиления поврежденной подкрановой балки, для которой проводили оценку прочности в п. 3. 2. Было выявлено, что при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,400$ несущая способность сжатого пояса, а, следовательно, и всей балки, снизилась до 12,8%. Рассмотрим вариант восстановления несущей способности сжатого пояса, при котором в качестве усиления предлагается устройство двух равнополочных уголков 90х6, закрепленных к сжатому поясу и стенке на высокопрочных балках (см. Рисунок 3.16).

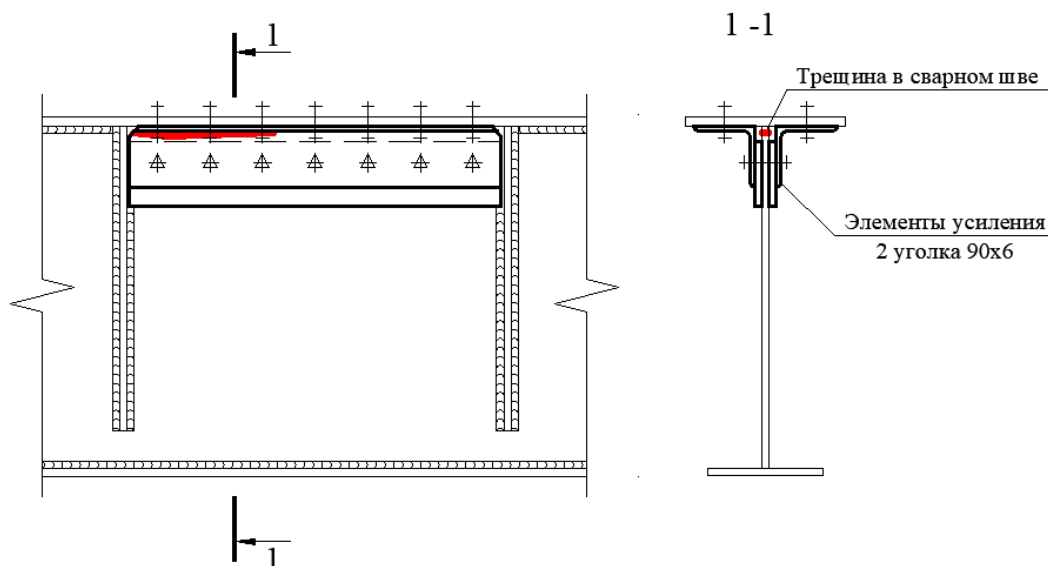


Рисунок 3.16. Схема усиления сжатого пояса подкрановой балки с усталостной трещиной

Благодаря введению в конструкцию дополнительных элементов, повышается площадь сечения, увеличивается изгибная и крутильная жесткости поврежденной балки. Подставляя полученные после перерасчета измененные геометрические характеристики балки в формулу (3.13), получаем:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x = \frac{1831 \cdot 1000}{0,862 \cdot 571575 \cdot 310 \cdot 1} \times$$

$$\times 52,2 + \frac{332 \cdot 1000}{381172 \cdot 310 \cdot 1} 57 = 0,786 < 1. \quad (3.18)$$

Видно, что сравнительно простое усиление сжатого пояса привело к значительному повышению его несущей способности (до 18%). Динамика изменения несущей способности балки в сечении с трещиной с учетом усиления показана на Рисунке 3.17.

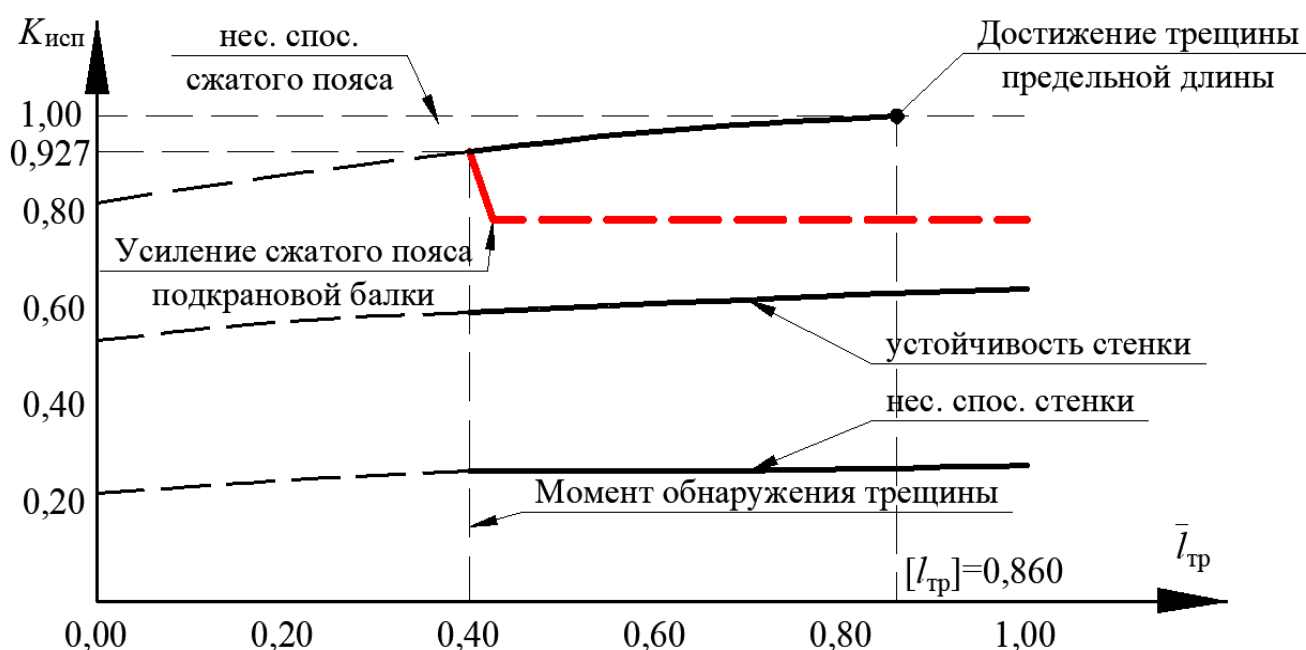


Рисунок 3.17. Динамика изменения несущей способности подкрановой балки с трещиной

Таким образом, можно констатировать, что продление сроков временной эксплуатации поврежденной подкрановой балки за счет усилений и проведения мероприятий по торможению роста трещин позволит получить значительный экономический эффект, связанный с меньшим количеством замен поврежденных конструкций и сохранением непрерывности производственного цикла.

3. 5. Выводы по третьей главе

1. Разработан алгоритм определения несущей способности сварных подкрановых балок с трещинами при действии изгибающего момента и поперечной силы с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса. Получены новые результаты в виде зависимостей средних нормальных напряжений в сжатом поясе и максимальных касательных напряжений в стенке от длины трещины, ее положения в отсеке и гибкости стенки.

2. Усталостные трещины и сопутствующие геометрические несовершенства сжатого пояса и стенки существенно влияют на снижение несущей способности поврежденных подкрановых балок. При действии изгибающего момента нормальные напряжения в сжатом поясе возрастают от 15,9% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ до 24,7% при $\bar{l}_{тр} = 1,00$. При действии поперечной силы наблюдается возрастание касательных напряжений в стенке от 18,2% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ до 31,3% при $\bar{l}_{тр} = 1,00$.

3. Разработана инженерная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке на прочность, в которой влияние трещины учитывается соответствующими понижающими коэффициентами:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x \leq 1;$$

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} \leq 1;$$

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{1,тр} \sigma_{cr,ef}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{2,тр} \tau_{cr,ef}} \right)^2} \leq 1,$$

где $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$ – коэффициенты, которые учитывают влияние трещины на перераспределение напряжений в балке, имеющей начальные несовершенства, $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ – коэффициенты влияния трещины на устойчивость стенки, зависящие от

относительной длины трещины $\bar{l}_{\text{тр}}$, ее положения в отсеке и гибкости стенки $\bar{\lambda}_{w,\text{тр}}$.

4. Разработана методика определения предельной длины трещины $[\bar{l}_{\text{тр}}]$, при которой наступает предельное состояние подкрановой балки. Предложены рекомендации по определению срока временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок.

5. Показано, что введение в конструкцию дополнительных элементов, усиливающих сжатый пояс, эффективно отражается на повышении несущей способности подкрановой балки с трещинами.

ГЛАВА 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ДАННЫМИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

4. 1. Экспериментальные исследования эксплуатируемых подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке

4. 1. 1. Цель и задача эксперимента

Экспериментальные исследования моделей подкрановых балок с трещинами в разное время выполняли Спирин Г. И. [104], Крылов И. И. [53], Васюта Б. Н. [20], Железнов А. А. [34], Ларионов В. В. [63], Бабкин В. И. [64], Москвичев В. В., Чабан Е. А. [114] и др. Большинство натурных исследований проводилось для верификации разработанных теоретических моделей долговечности балок, полученных с помощью инструментов механики разрушения. Натурные исследования влияния трещин на устойчивость стенки и несущую способность элементов подкрановых балок распространены в меньшей степени, среди них можно выделить испытания Железнова А. А. и Крылова И. И. [34].

Среди зарубежных авторов экспериментальными исследованиями подкрановых балок занимались Wardenier J. [136], Weidner P. [137], Zai J. [140] и др. [118-122, 128-135], однако ими преимущественно рассматривались вопросы усталостной прочности подкрановых балок, влияние трещины на изменение напряженно-деформированного состояния изучалось в меньшей степени.

Отметим, что в рамках лабораторных экспериментов весьма затруднительно учесть реальный режим загрузки подкрановых балок, а также дефекты и несовершенства, возникающие в эксплуатируемых подкрановых балках. Поэтому для полноты анализа и получения более достоверных данных о характере влияния упомянутых дефектов и несовершенств на работу поврежденных балок под циклической нагрузкой наиболее целесообразно проведение натурных

исследований подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, эксплуатируемых на действующем производстве.

С целью подтверждения достоверности полученных теоретических результатов и предложенной инженерной методики расчета в сочетании с имеющимися результатами продолжительного мониторинга и выполненных усилениях совместно с ООО «НИПИ «ЭРКОН» планировалось проведение натурных испытаний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, эксплуатируемых на производстве металлургической компании ПАО «Северсталь».

В основные задачи экспериментального исследования входило:

1. Выявить наиболее часто встречающиеся дефекты и повреждения подкрановых конструкций: крепление рельса с обнаруженными зазорами; эксцентриситет рельса относительно оси балки; местные искривления сжатого пояса и его крепления к рабочим площадкам и др.
2. Изучить технологический процесс работы кранов с целью определения наихудшего нагружения балок в зонах с трещинами.
3. Изучить особенности напряженно-деформированного состояния элементов балки в области образовавшихся усталостных трещин в стенке.
4. Определить качественные и количественные закономерности снижения несущей способности подкрановых балок.
5. На основании экспериментальных исследований и анализа проводимого мониторинга выявить и оценить величину резервов несущей способности сварных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

Программа испытаний повреждённых балок, согласованная с ПАО «Северсталь», приведена в Приложении 1.

В связи с форс-мажорными обстоятельствами и сокращением финансирования, вызванных началом СВО, руководством ПАО «Северсталь» было принято решение о переносе активных экспериментальных исследований поврежденных подкрановых балок на неопределенный срок. По этой причине для верификации полученных теоретических результатов и инженерной методики

расчета обратимся к данным натурных испытаний и материалам продолжительного мониторинга подкрановых балок с трещинами в стенке здания главного корпуса сталеплавильного производства (конвертерного цеха) ПАО «Северсталь», выполненных ООО «НИПИ «ЭРКОН».

4. 1. 2. Объект экспериментального исследования

В качестве объекта испытаний применялись эксплуатируемые подкрановые балки здания главного корпуса сталеплавильного производства (конвертерного цеха) ПАО «Северсталь», общая технологическая схема цеха приведена на Рисунке 4.1. Уровень ответственности здания – повышенный (КС–3).

Подкрановые балки в конвертерном цехе выполнены сварными двутаврового сечения. Опираие балок осуществлено по неразрезной схеме, за исключением мест температурных швов здания цеха и мест сопряжения балок с ездовыми поясами подкраново-подстропильных ферм. Опираие происходит на ступени колонн поперечных рам. Крепление балок к колоннам выполнено при помощи отрывных планок и смонтированных в опорных узлах балок раскосов, передающих отрывные усилия на колонну. Пролёты балок – переменные от 7 до 17 м. Сечения балок над опорами и в пролётах – различные: меняются за счёт уменьшения или увеличения толщины стенок, а также толщины и ширины нижнего пояса, что обусловлено более оптимальным расходом стали по длине балки. Стенки балок укреплены поперечными и продольными рёбрами жёсткости. Монтажные стыки листов полок и стенок, за исключением новых балок, выполнены на сварке. Монтажные стыки новых балок выполнены на высокопрочных болтах. Группа режима работы кранов – 7К (тяжелый).

Крепление подкрановых рельсов к верхним поясам балок осуществлено с помощью прижимных планок. Типы применяемых подкрановых рельсов: КР-120 и КР-140.

Рисунок 4.1. Схема конвертерного цеха

Вертикальные вспомогательные фермы смонтированы параллельно подкрановым балкам между колоннами рам и выполнены из спаренных уголков, составленных в тавр. На верхние пояса ферм опирается тормозной настил. Горизонтальные связевые фермы смонтированы в уровне нижних поясов подкрановых балок (между самими балками и нижними поясами вертикальных вспомогательных ферм) и крепятся к ним при помощи фасонки. Решётка ферм выполнена из одиночных уголков. Фермы служат для раскрепления нижних поясов балок из плоскости, а также для расположения на них ходовых мостков. Тормозной настил опирается на верхние пояса подкрановой балки и вспомогательной фермы и представляет собой стальной лист толщиной 8-10 мм, укрепленный поперечными ребрами жесткости. Поверху тормозного настила устроены проходные площадки.

Шифры рабочей документации на конструкции, выполненной ЦНИИПСК им. Мельникова: 3-2788-1-КМ – для балок по ряду В в осях 17-53; 3-2784-1-КМ – для балок по ряду Ж в осях 13/15-37. Рабочая документация на балки по ряду Ж в осях 37/39-45 выполнены ООО «Северсталь-Проект», шифр 711347-КМ2.

В процессе эксплуатации в период с 2004 по 2006 гг. часть подкрановых балок пролётов В-Г и Ж-И была заменена (десять балок по ряду В/27-49 и восемь балок по ряду Ж/23-31, Ж/35-37 и Ж/(37/39-45)). Новые балки выполнены сварными двутаврового переменного сечения с поперечными ребрами жесткости. В ходе замены подкрановых балок существующие вертикальные и горизонтальные фермы и тормозной настил не были заменены и остались прежними. Крепление тормозного настила к верхним поясам новых балок и фасонки горизонтальных связевых ферм к нижним поясам также выполнены на высокопрочных болтах.

Материалы, примененные в подкрановых конструкциях, согласно проектным данным, актам приёмки в эксплуатацию и сертификатам качества материалов:

- новых подкрановых балок в осях Ж/31-35 пролёта Ж-И – сталь РСЕ36WZ35 по ТУ 5.961-11679-2002;
- подкрановых балок в осях Д-Е/(61/1-66) – сталь 09Г2С-12 по ГОСТ 19282-73*;
- остальных подкрановых балок – сталь 10Г2С1Д-12 по ГОСТ 19231-73.

4. 1. 3. Натурные испытания подкрановой балки с усталостной трещиной

По результатам обследования, проведенного ООО «НИПИ «ЭРКОН», на участках подкрановой балки пролета Ж-И, расположенной в осях Ж/45-47, были зафиксированы две значительные трещины в верхней части стенки подкрановой балки длиной 550 (470+80) мм и 1130 (560+570) мм (см. Рисунок 4.2). Подкрановая балка – неразрезная, длина между опорами $l = 12$ м, ширина отсеков $a = 2000$ мм. Сечение – сварной неравнополочный двутавр с верхним поясом сечением – 630х30 мм, стенкой – 2700х25 мм, нижним поясом – 560х20 мм. Материал балок – сталь 10Г2С1Д-12 по ГОСТ 19282-73. При толщинах поясов и стенок $t \geq 16$ мм расчетное сопротивление стали изгибу по пределу текучести: $R_y = 311,8$ МПа.

а)



б)

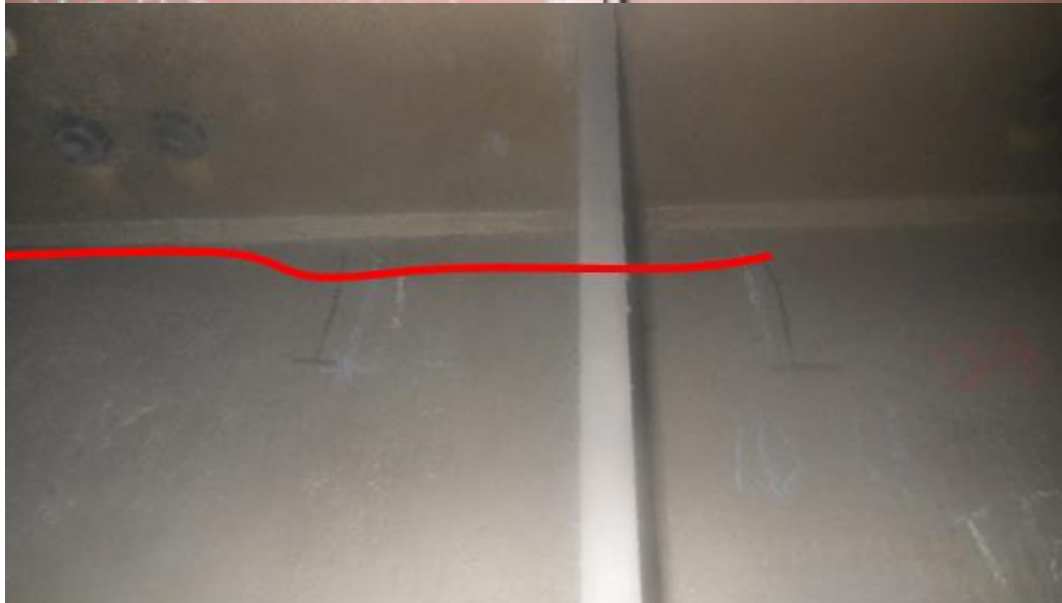


Рисунок 4.2. Фотофиксации трещин: а) длиной 560 + 570 мм; б) длиной 470 + 80 мм

Для определения величины реально действующих напряжений в балке были проведены натурные испытания с применением тензоизмерительной станции TDS-530. Общая схема испытуемых конструкций и расстановки тензодатчиков представлена на Рисунке 4.3.

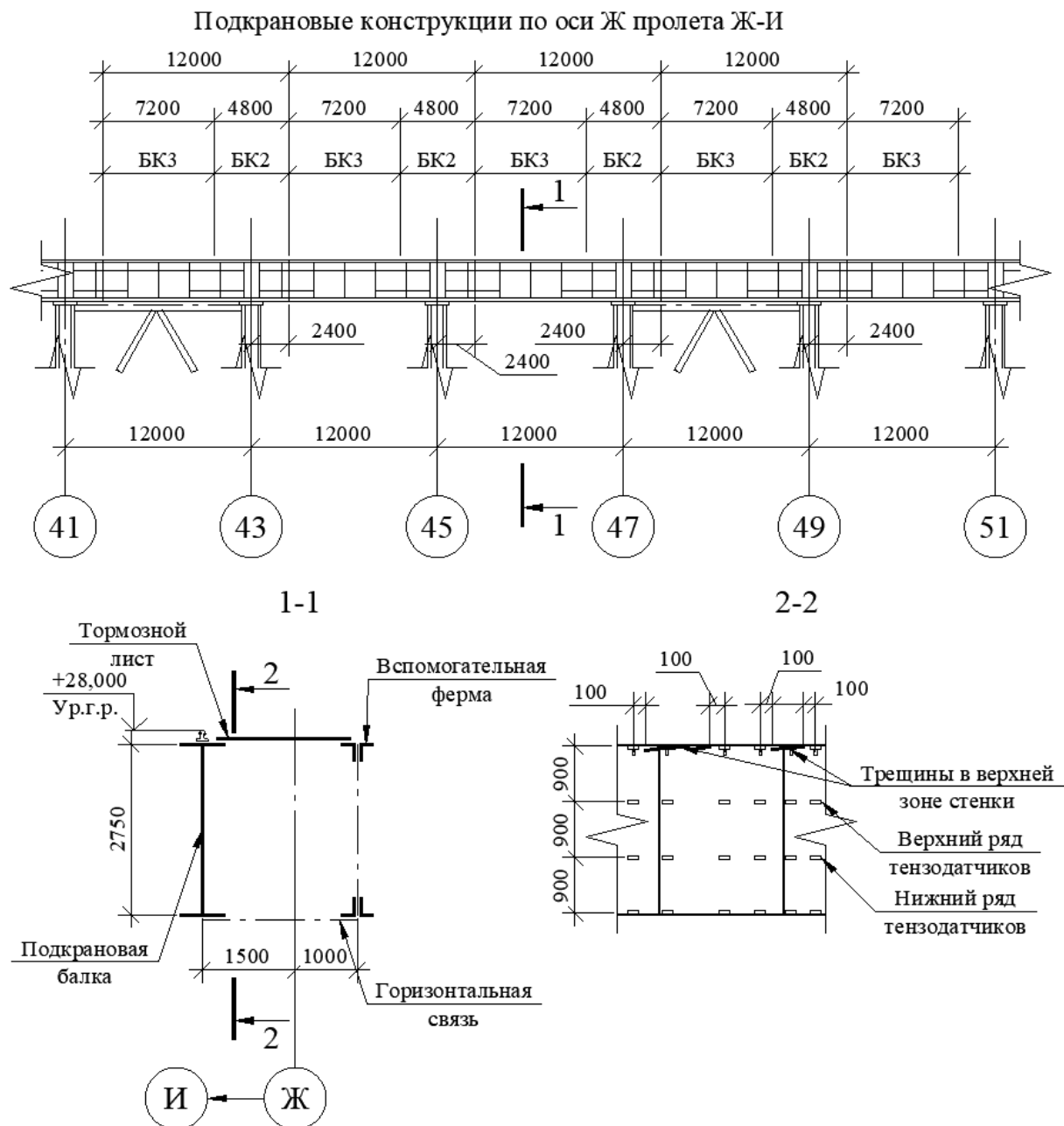


Рисунок 4.3. Схема расстановки тензодатчиков в поврежденном отсеке подкрановой балки с трещиной

Испытания производились отдельно для каждой трещины. Тензоизмерительные датчики были расставлены по трем нормальным сечения подкрановой балки вблизи трещины длиной 470 мм и по двум вблизи трещины 1130 мм (см. Рисунок 4.4).

При проведении испытаний была достаточно точно определена величина нагрузки от мостового крана, приходящейся на подкрановую балку: масса пустой

бадьи составляла 130 т., масса бадьи с грузом – 520 т., тележка с грузом при проведении испытаний максимально приближалась к испытываемой балке. Максимальная давление от колеса крана на рельс составило 74,7 тс. В условиях эксперимента нагрузка на подкрановую балку от мостового крана действовала только в вертикальном направлении без учета горизонтальной составляющей от возможного торможения тележки. Схема распределения давлений ходовых колес на подкрановый рельс представлена на Рисунке 4.5.

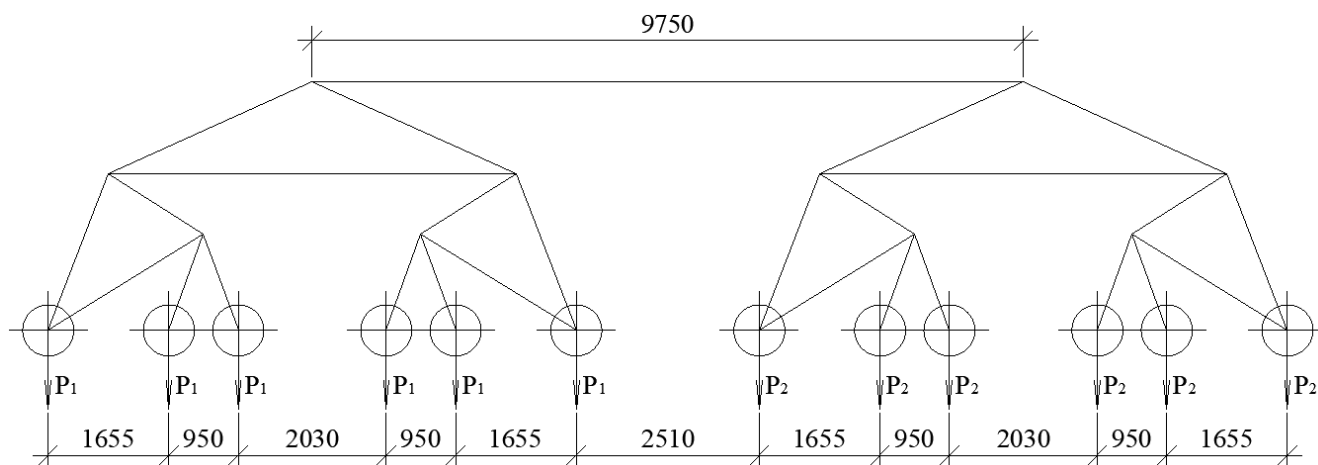


Рисунок 4.5. Схема распределения давлений ходовых колес на подкрановый рельс: $P_1 = 73,4$ тс; $P_2 = 74,7$ тс

По результатам испытаний были определены нормальные напряжения, действующие в сечениях поврежденной балки. Результаты сравнения средних нормальных напряжений в сжатом поясе, полученных по результатам эксперимента и вычисленных по разработанной методике расчета, приведены в Таблицах 4.1 – 4.2.

Таблица 4.1. Результаты сравнения средних нормальных напряжений в сжатом поясе (начало)

M , кНм	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$\bar{l}_{тр}$	$C_{f,тр}$	Средние нормальные напряжения в сжатом поясе		$\frac{\sigma_{f,эксп} - \sigma_{f,теор}}{\sigma_{f,эксп}}$
				$\sigma_{f,эксп}$, МПа	$\sigma_{f,теор}$, МПа	
6748	4,257	-	-	88,1		-

**Таблица 4.2. Результаты сравнения средних нормальных напряжений
в сжатом поясе (окончание)**

$M,$ кНм	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$\bar{l}_{тр}$	$C_{f,тр}$	Средние нормальные напряжения в сжатом поясе		$\frac{\sigma_{f,эксп} - \sigma_{f,теор}}{\sigma_{f,эксп}}$
				$\sigma_{f,эксп},$ МПа	$\sigma_{f,теор},$ МПа	
6748	4,257	0,283	0,876	95,7	100,6	-5,1%
Увеличение напряжений				+8,6%	+14,2%	
6491	4,257	-	-	84,7		-
6491	4,257	0,235	0,886	90,6	95,6	-5,6%
Увеличение напряжений				+11,9%	+12,9%	

Видно, что предложенная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке хорошо согласуется с данными натурных экспериментов, величины полученных напряжений близки. Во всех случаях теоретические напряжения больше экспериментальных, что показывает небольшие запасы, заложенные в предлагаемой методике. Расхождения между результатами (до 5,6%) в основном связаны с тем, что в натурном эксперименте определялись фибровые напряжения по внутренней грани пояса, в то время как, по разработанной методике вычисляются срединные напряжения (в соответствии с нормативными методиками расчета).

Учитывая все вышеупомянутые факторы, сравнение предложенной методики расчета с натурными испытаниями эксплуатируемых подкрановых балок с трещинами демонстрирует достоверность полученных результатов.

4. 1. 4. Анализ данных мониторинга

Для сравнительного анализа теоретических результатов с данными мониторинга выделим 35 повреждённых подкрановых балок с известными прочностными характеристиками стали, геометрическими параметрами балок и

нагрузками, которые в течение значительного времени безаварийно эксплуатировались с усталостными трещинами в сжатой зоне стенки.

Режим работы кранов в рассматриваемом цехе – 7К (тяжелый), тип подвеса кранов – гибкий, грузоподъемность до 520 тс. Все отобранные подкрановые балки – неразрезные, длина между опорами $l = 12$ м, ширина отсеков $a = 1500 - 2000$ мм, типовая схема балки с нумерацией отсеков показана на Рисунке 4.6. Материал балок – сталь 10Г2С1Д-12 по ГОСТ 19282-73. При толщинах поясов и стенок $t \geq 16$ мм расчетное сопротивление стали изгибу по пределу текучести: $R_y = 311,8$ МПа, расчетное сопротивление на сдвиг $R_s = 180,8$ кН/см².

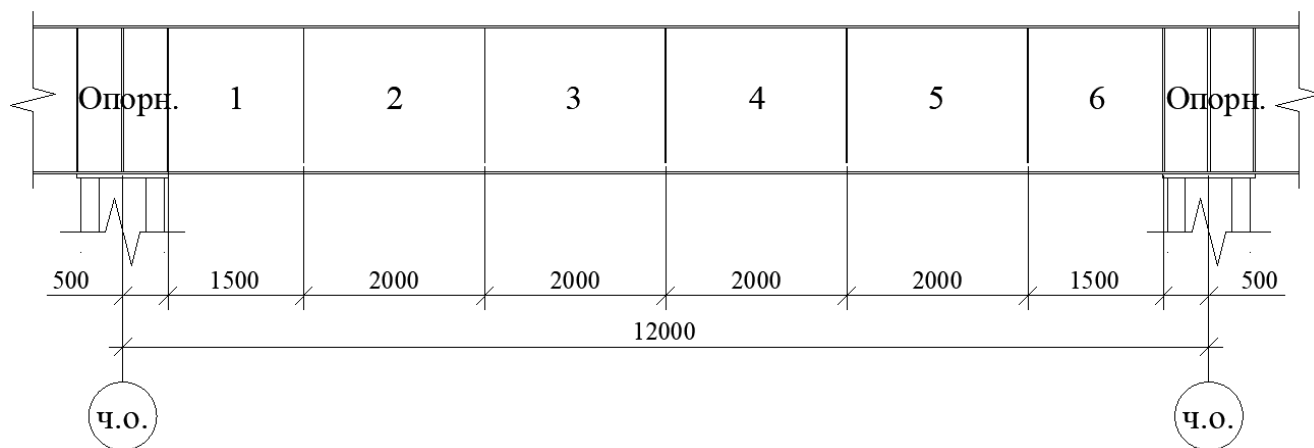


Рисунок 4.6. Типовая схема подкрановых балок с нумерацией отсеков

Сводная информация по изменению дефектов в отобранных подкрановых балках приведена в Таблицах 4.3 – 4.6, динамика изменения трещин в верхних зонах стенок подкрановых балок показана на Рисунках 4.7 – 4.12.

Таблица 4.3. Сводная таблица изменения длины трещин (в мм) подкрановых балок в период 2010 – 2013 гг. (начало)

№ п/п	Оси	Номера отсеков	2010	2011			2012			2013		
			ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	апрель- май	декабрь
Пролет В-Г												
Трещины в верхней части стенки подкрановой балки по ряду В												
1.	51-53	5-6	400	400	400	400	Усилена					
Трещины в верхней части стенки подкрановой балки по ряду Г												
2.	55-57	Опорный,1	-	-	-	200	200	200	200	200	200	200
Пролет Д-Е												
Трещины в верхней части стенки подкрановой балки по ряду Д												
3.	27-29	6-7	-	-	-	-	-	-	-	155	155	155
4.	35-37	8 и опорный	-	-	-	300+200	310+200	310+200	310+200	3 ¹ и Р ²	Усилена	
5.	51-53	2	-	-	200	235	235	235	235	Усилена		
6.	53-55	4-5	-	-	-	70	70	70	70	3 и Р	3 и Р	3 и Р
7.	53-55	5-6	-	-	-	70	70	90	90	3 и Р	3 и Р	3 и Р

¹ З – заварена трещина в верхней части стенки подкрановой балки.

² Р – рассверлены края трещины в верхней части стенки подкрановой балки.

Таблица 4.4. Сводная таблица изменения длины трещин (в мм) подкрановых балок в период 2010 – 2013 гг. (продолжение)

№ п/п	Оси	Номера отсеков	2010	2011			2012			2013		
			ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	апрель- май	декабрь
8.	53-55	8 и опорный	-	400	590	620	690	690	800	Усилена		
9.	55-57	1-2	-	-	340	340	355	355	355	Усилена		
Трещины в верхней части стенки подкрановой балки по ряду Е												
10.	29-31	2-3	3	40	40	40	100	100	100	190	Усилена	
11.	33-35	3	3	165	165	165	165	165	200	200	3 ¹	3
Пролет Е'-Ж												
Трещины в верхней части стенки подкрановой балки по ряду Ж												
12.	35-37	Опорный 37	-	-	-	-	-	80	80	80	80	80
13.	37- 37/39	1,2	-	-	-	60	80	80	80	-	-	-
14.	37/39- 41	1,2	-	-	-	-	-	130	160	210	210	210
15.	41-43	1,2	-	-	200	200	200	200	200	300	300	300
16.	41-43	4,5 выходит из 4-го отсека	-	-	-	-	140	140	140	170	170	170

¹ 3 – заварена трещина в верхней части стенки подкрановой балки.

Таблица 4.5. Сводная таблица изменения длины трещин (в мм) подкрановых балок в период 2010 – 2013 гг. (продолжение)

№ п/п	Оси	Номера отсеков	2010	2011			2012			2013		
			ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	апрель- май	декабрь
17.	41-43	Опорный 43	-	55+25	55+25	55+25	55+25	55+25	55+25	110	110	110
18.	43-45	2	-	-	-	-	120	120	120	290	290	290
19.	45-47	Опорный 45	-	120	120	140	140	140	140	-	-	-
20.	47-49	2,3	-	-	-	-	-	-	170	310	310	310
21.	49-51	Опорный 49, 1	200	200	330	445	445	Усилена				
22.	51-53	1,2	-	190+80	190+80	190+80	190+80	Усилена				
23.	53-55	6, опорный 55	-	135	135	135	135	135	135	160, Р ¹	170	170
24.	55-57	Опорный 55, 1	-	180	180	200	200	200	200	З ² и Р	Р, 200	Р, 200
25.	55-57	2	-	-	-	-	-	-	-	200	200	200
26.	57-59	Опорный 57, 1	-	280	280	340	340	340	340	Усилена		

¹ Р – рассверлены края трещины в верхней части стенки подкрановой балки.

² З – заварена трещина в верхней части стенки подкрановой балки.

Таблица 4.6. Сводная таблица изменения длины трещин (в мм) подкрановых балок в период 2010 – 2013 гг. (окончание)

№ п/п	Оси	Номера отсеков	2010	2011			2012			2013		
			ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	июль	ноябрь	март- апрель	апрель- май	декабрь
Пролет Ж-И												
Трещины в верхней части стенки подкрановой балки по ряду Ж												
27.	13/15- 17/15	1	-	210	210	210	220	270	270	270	270	270
28.	21-23	1	-	70	70	80	80	90	90	190	220	220
29.	45-47	4-5	-	-	280	300	350	350	400	470	500	500
30.	47-49	1-2	-	390	390	390	390	390	410	410	410	410
31.	49-51	1-2	-	260	260	260	260	260	260	Усилена		
32.	49-51	2	-	-	340	380	380	380	440	3	3	3
33.	53-55	Опорный 53-1	-	-	220	260	500	570	570	620	Усилена	
34.	53-55	Опорный 55	-	220	220	240	240	240	240	3 ¹	3	3
35.	55-57	Опорный 55-1	-	165	165	165	185	210	210	3 и P ²	3 и P	3 и P

¹ 3 – заварена трещина в верхней части стенки подкрановой балки.

² Р – рассверлены края трещины в верхней части стенки подкрановой балки.

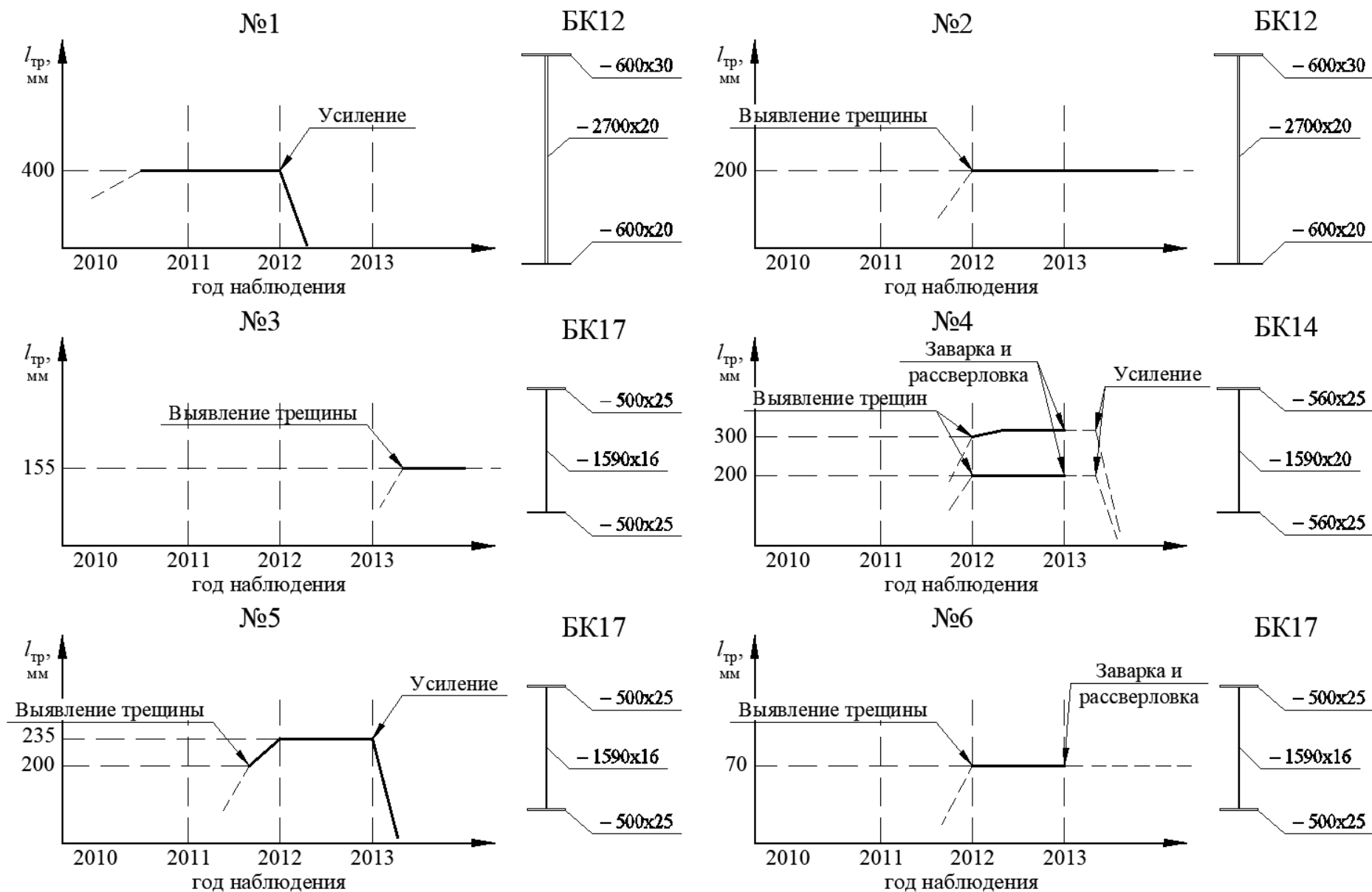


Рисунок 4.7. Динамика изменения трещин в верхней зоне стенки подкрановых балок по результатам мониторинга (№1 – №6)

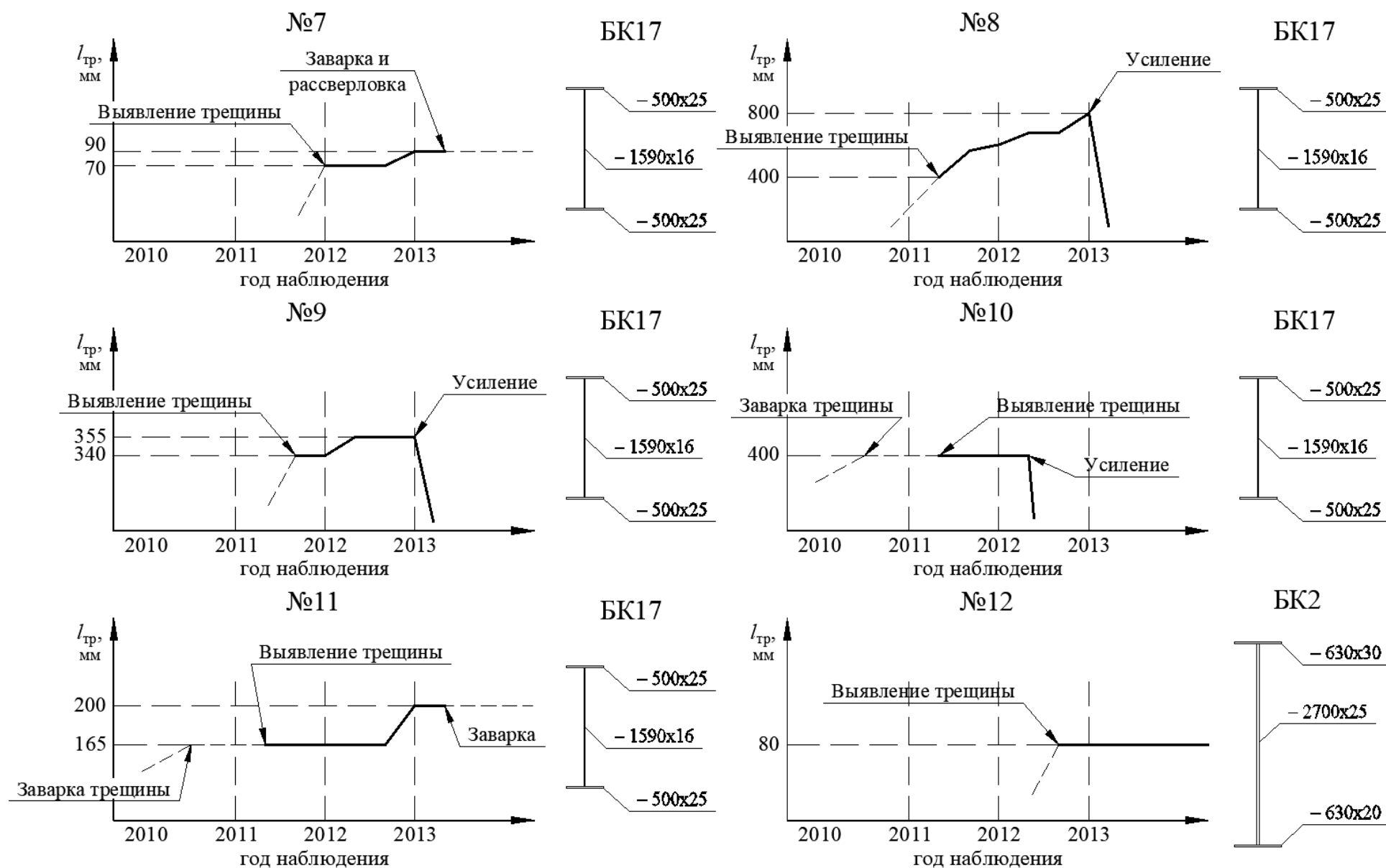


Рисунок 4.8. Динамика изменения трещин в верхней зоне стенки подкрановых балок по результатам мониторинга (№7 – №12)

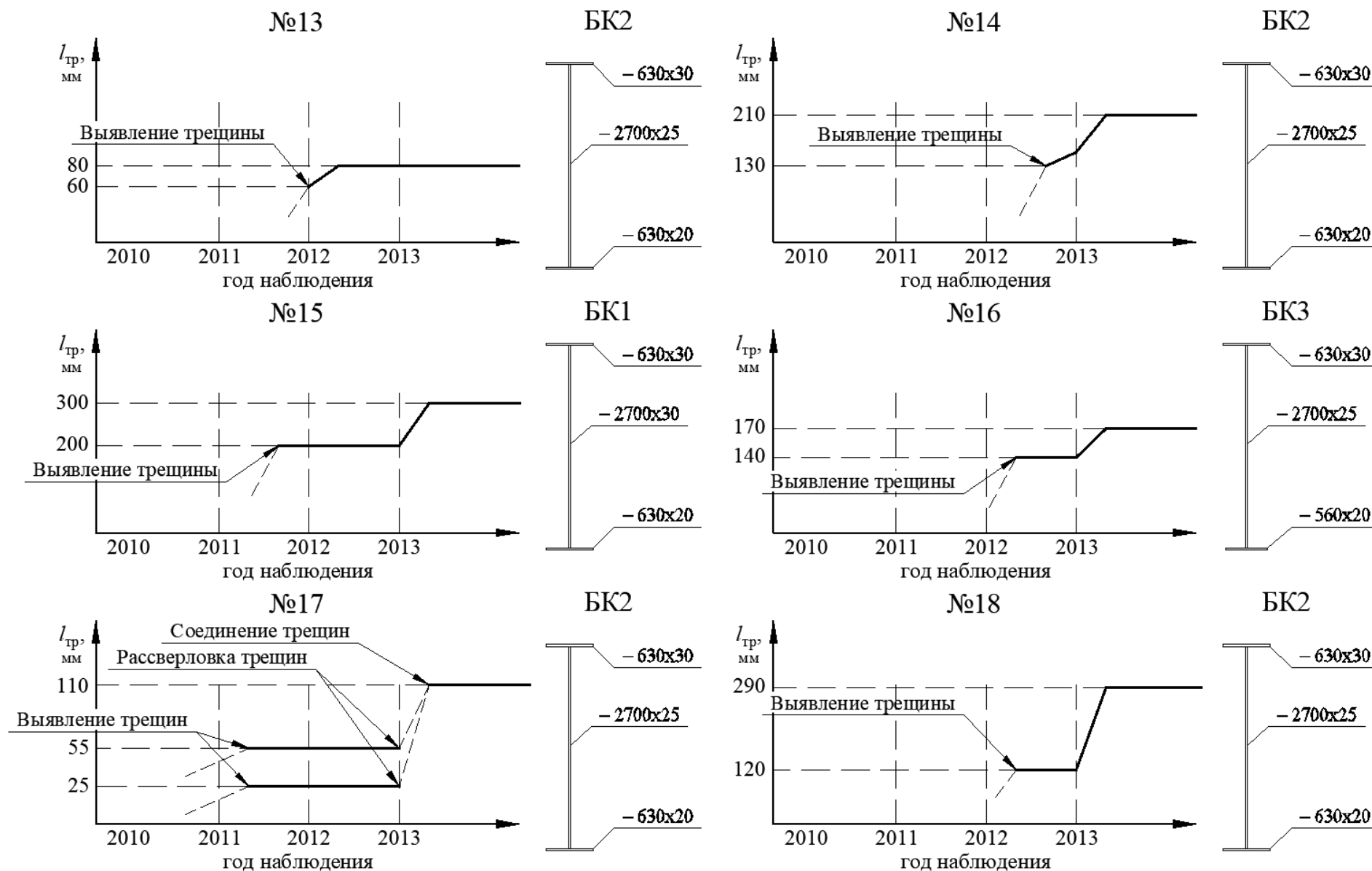


Рисунок 4.9. Динамика изменения трещин в верхней зоне стенки подкрановых балок по результатам мониторинга (№13 – №18)

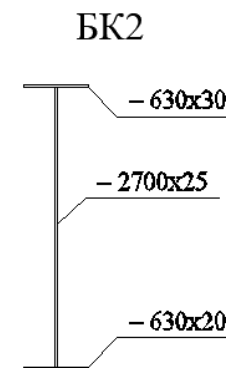
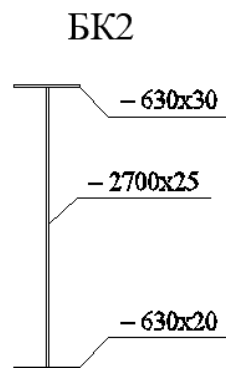
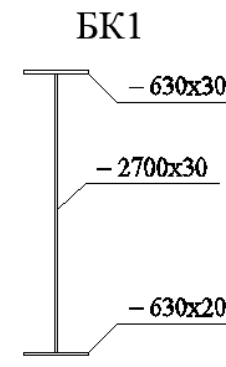
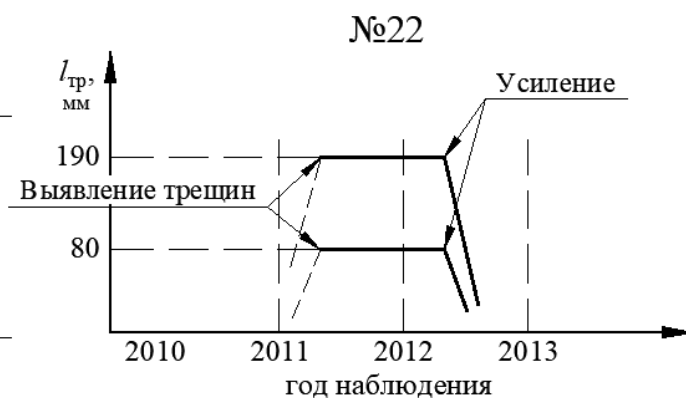
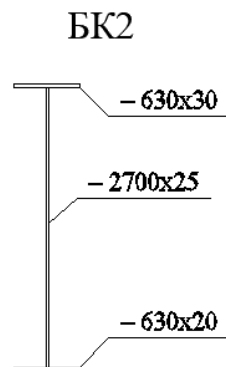
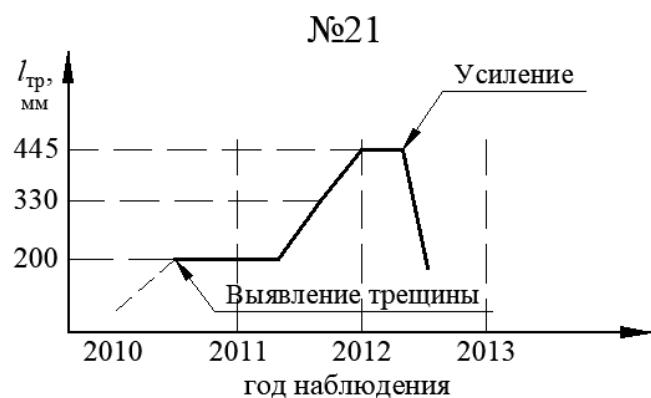
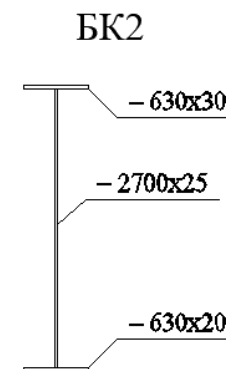
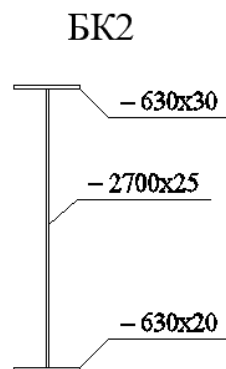
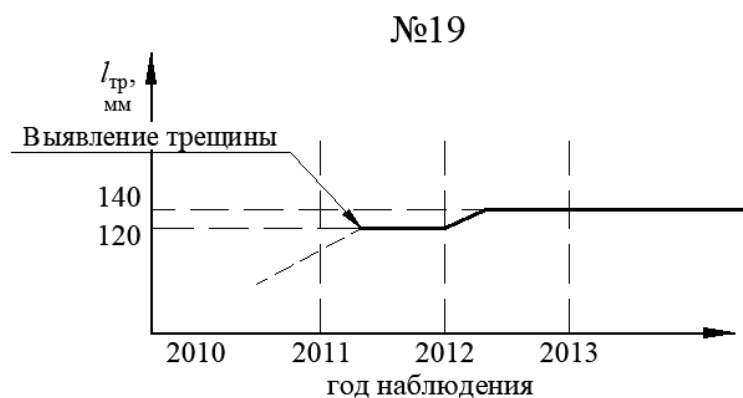


Рисунок 4.10. Динамика изменения трещин в верхней зоне стенки подкрановых балок по результатам мониторинга (№19 – №24)

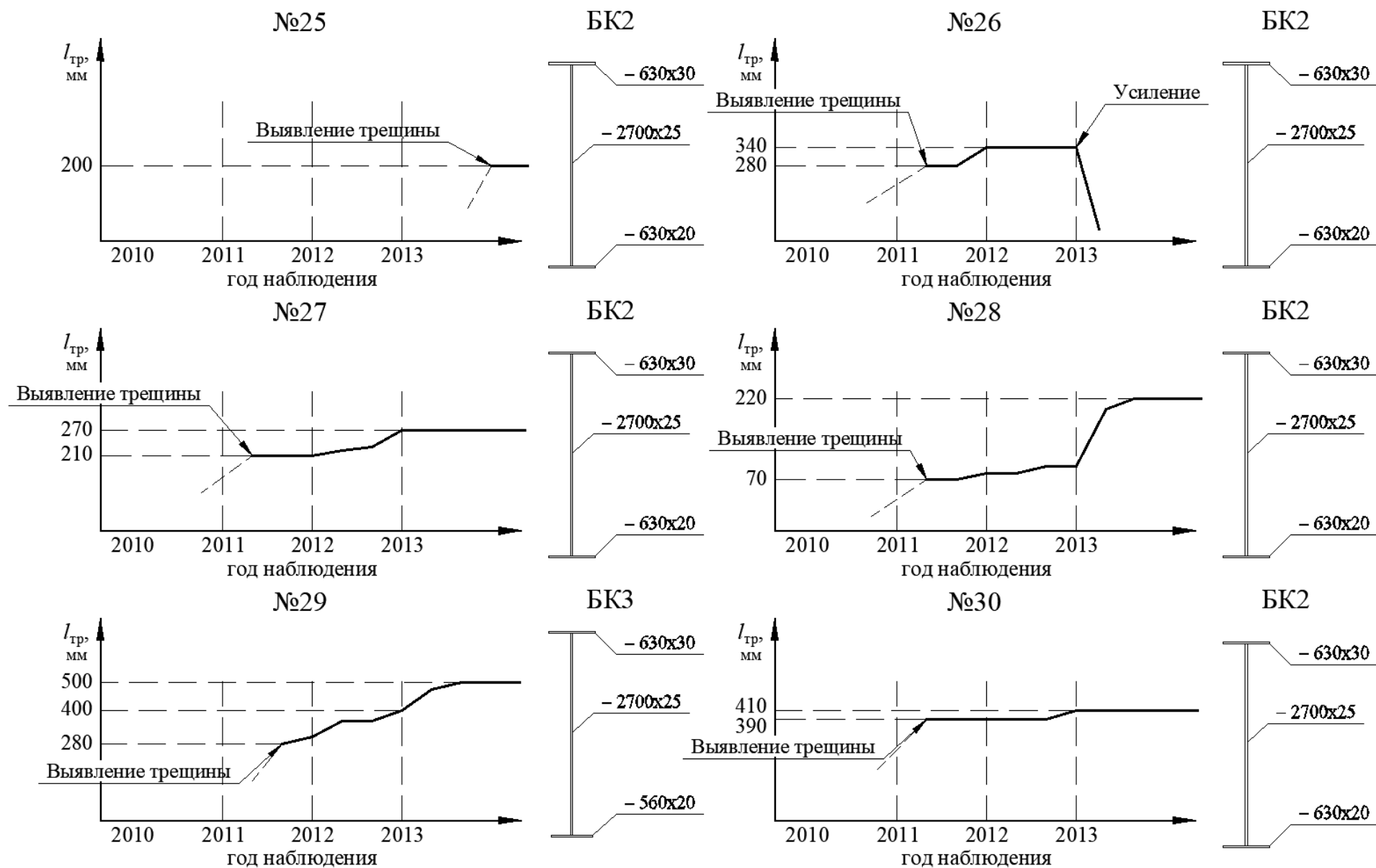


Рисунок 4.11. Динамика изменения трещин в верхней зоне стенки подкрановых балок по результатам мониторинга (№25 – №30)

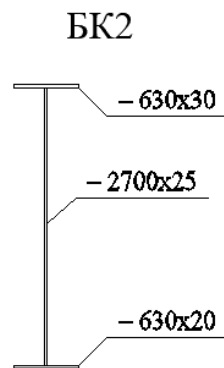
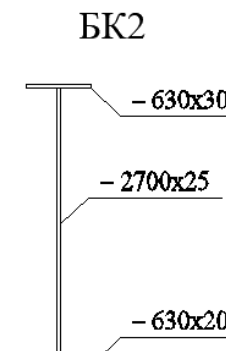
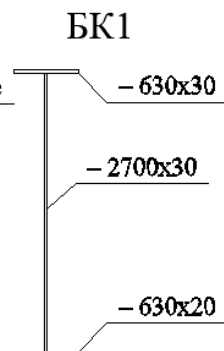
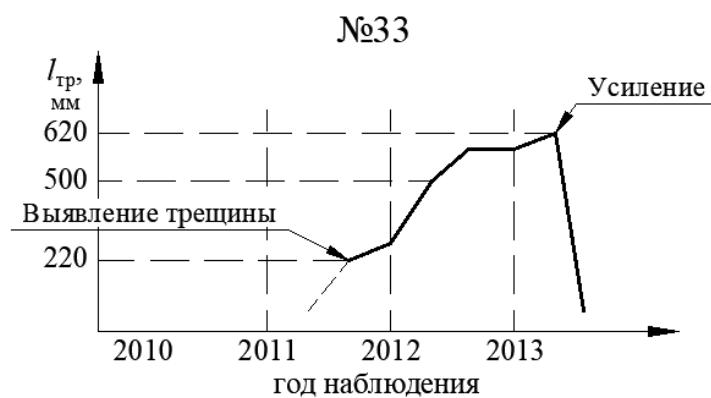
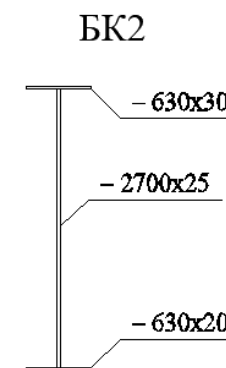
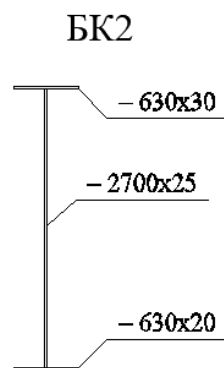
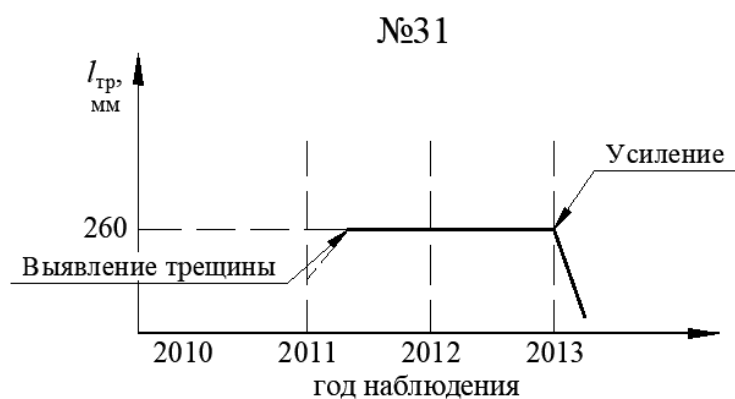


Рисунок 4.12. Динамика изменения трещин в верхней зоне стенки подкрановых балок по результатам мониторинга (№31 – №35)

Проведем поверочный расчет по разработанной инженерной методике поврежденной подкрановой балки №1 в осях 51-53/В пролета В-Г (марка сечения – БК12) с усталостной трещиной в верхней зоне стенки у ребра жесткости в 5-м отсеке длиной $l = 400$ мм. Схема балки и кранов показаны на Рисунках 4.13 – 4.14.

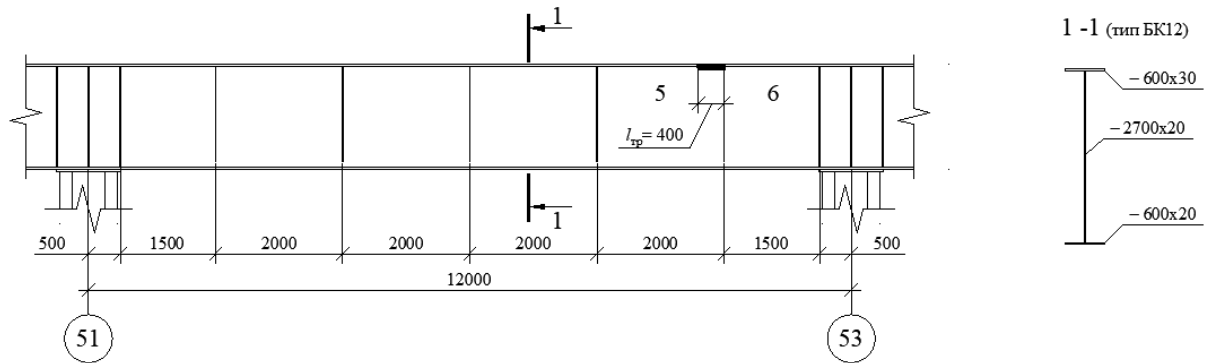


Рисунок 4.13. Схема поврежденной подкрановой балки №1

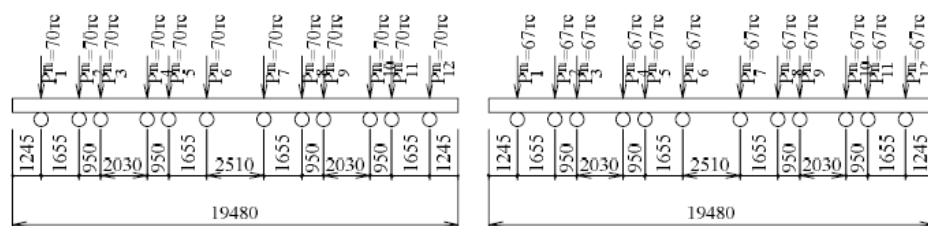


Рисунок 4.14. Схема кранов с нормативными значениями нагрузок

Построим линии влияния и соответствующие эпюры внутренних усилий (см. Рисунки 4.15 – 4.17) в рассматриваемой подкрановой балке, при наиболее неблагоприятном положении кранов:

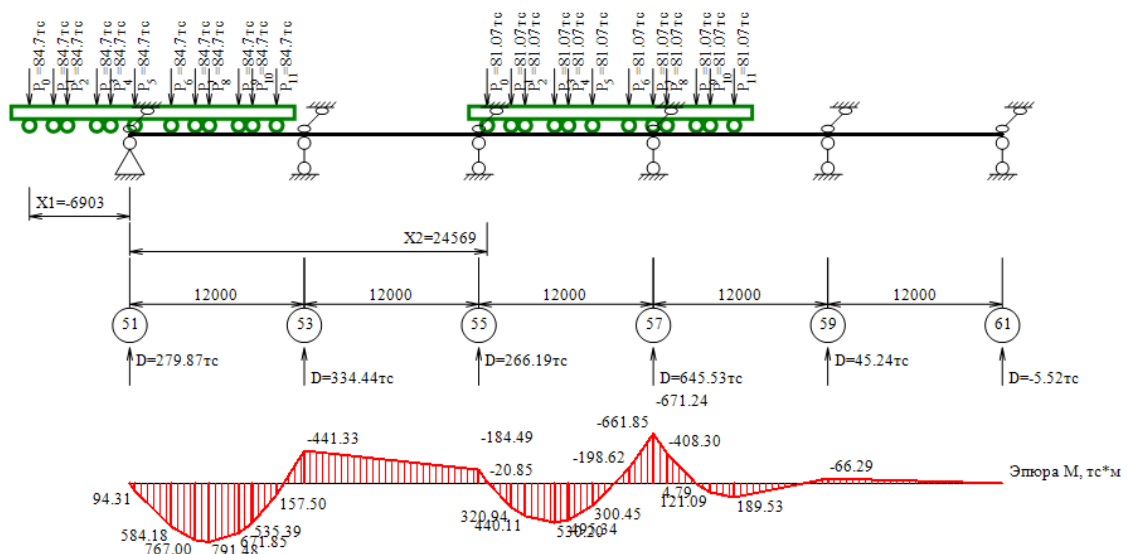


Рисунок 4.15. Эпюра усилий M_x от вертикальной нагрузки при расчетном положении кранов, соответствующему максимальному изгибающему моменту, сжимающему верхний пояс

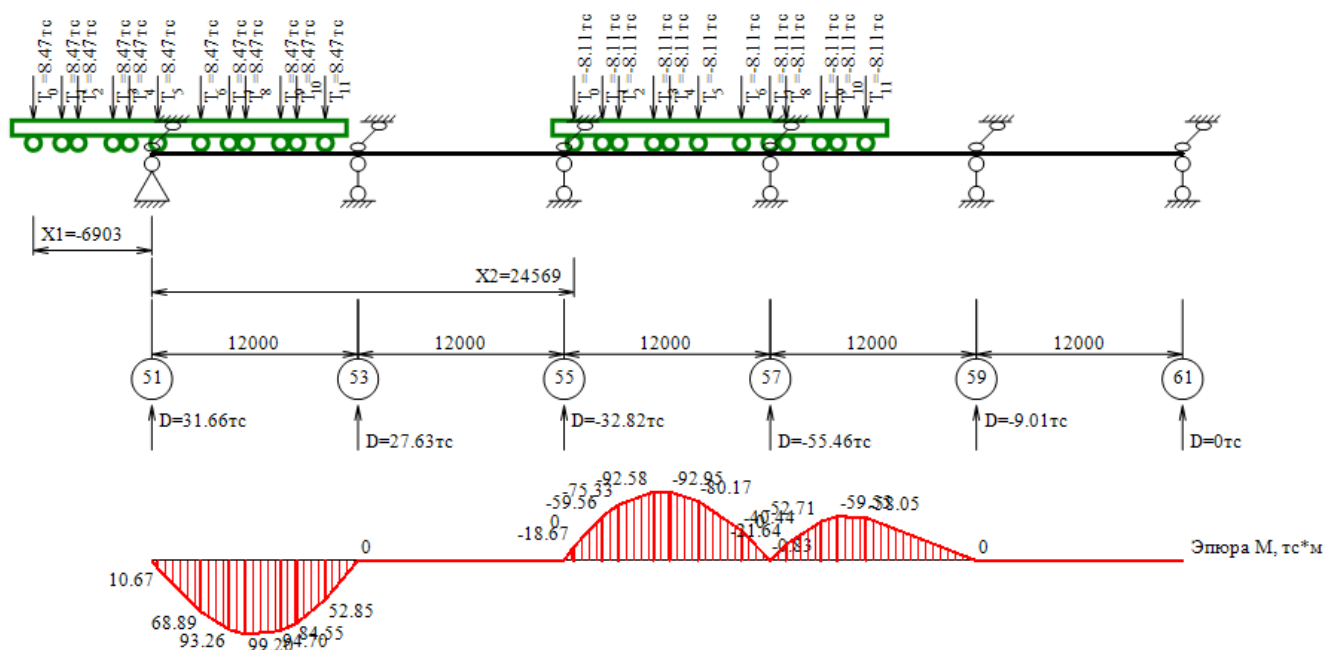


Рисунок 4.16. Эпюра усилий M_y от горизонтальной нагрузки при расчетном положении кранов, соответствующему максимальному изгибающему моменту, сжимающему верхний пояс

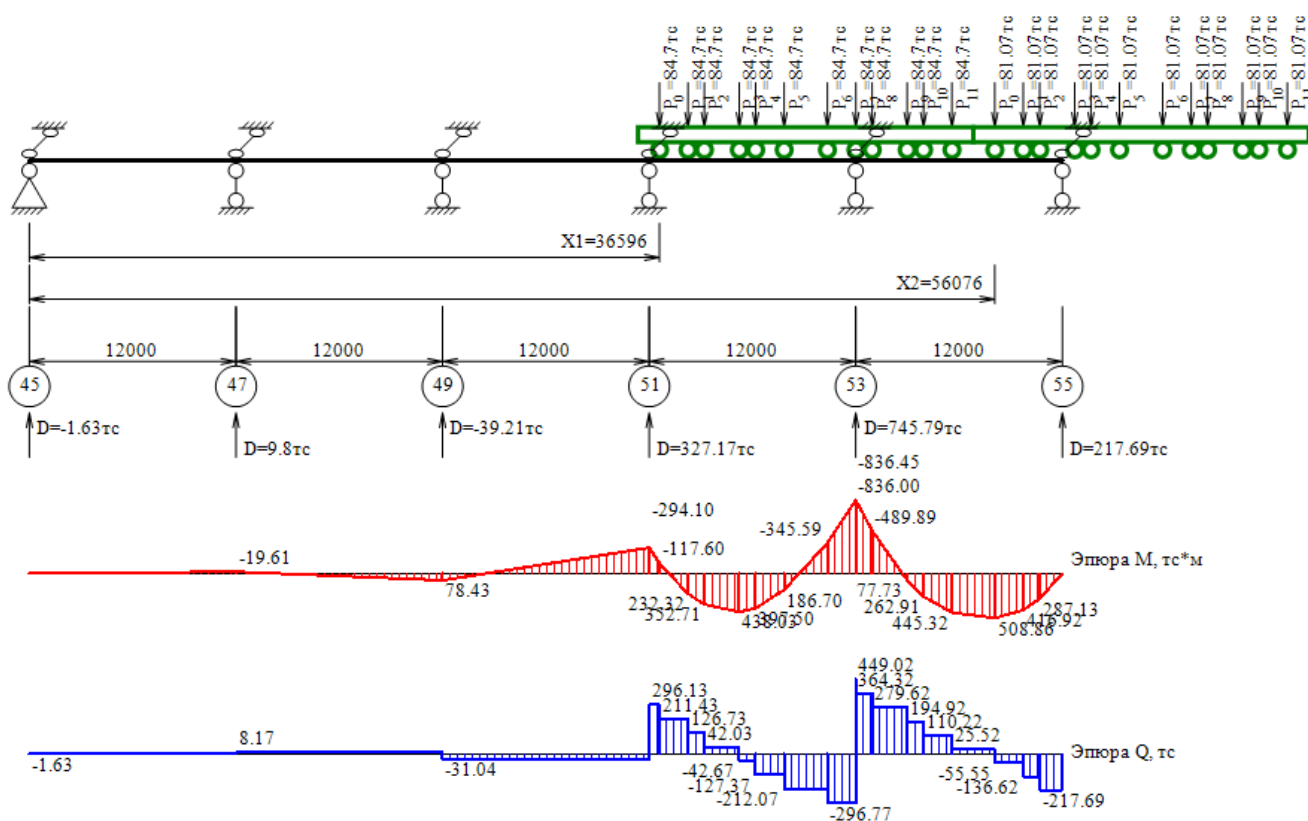


Рисунок 4.17. Эпюры усилий M_x и Q от вертикальной нагрузки при расчетном положении кранов, соответствующему максимальной поперечной силе, воспринимаемой стенкой

Внутренние усилия, соответствующие расчетному сечению с максимальным изгибающим моментом, сжимающем верхний пояс: $M_x = 711,6 \text{ тсм} = 6973,7 \text{ кНм}$; $M_y = 85,9 \text{ тсм} = 841,8 \text{ кНм}$. Внутренние усилия, соответствующие расчетному

сечению с максимальной поперечной силой, воспринимаемой стенкой: $M_x = 179,2 \text{ тсм} = 1756,2 \text{ кНм}$; $Q = 211,4 \text{ тс} = 2071,7 \text{ кН}$. Относительная длина трещины и условная гибкость стенки определяются по формулам (2.1) и (3.4):

$$\bar{l}_{\text{тр}} = l_{\text{тр}} / a_{\text{отс}} = 400 / 2000 = 0,200; \quad (4.1)$$

$$\bar{\lambda}_w = (h_{ef} / t_w) \sqrt{R_y / E} = (2700 / 20) \sqrt{311,8 / 206000} = 5,252; \quad (4.2)$$

$$\bar{\lambda}_{w,\text{тр}} = \bar{\lambda}_w \sqrt{320 / R_y} = 5,252 \sqrt{320 / 311,8} = 5,321. \quad (4.3)$$

Критические напряжения, вычисляемые по формулам (81), (83) п. 8.5.3 СП 16 как для неповрежденной стенки подкрановой балки:

$$\sigma_{cr,ef} = c_{cr} R_y / \bar{\lambda}_w^2 = 30 \cdot 311,8 / 5,252^2 = 366,2 \text{ МПа}; \quad (4.4)$$

$$\tau_{cr,ef} = 10,3 \left(1 + 0,76 / \mu^2 \right) R_s / \bar{\lambda}_d^2 = 10,3 \left(1 + 0,76 / 1,8^2 \right) 180,8 / 2,92^2 = 270,1 \text{ МПа}. \quad (4.5)$$

Нормальные и касательные напряжения для расчета устойчивости стенки, вычисляемые по формулам (78), (79) п. 8.5.2 СП 16:

$$\sigma = M y / I_x = 1756,2 \cdot 1000 \cdot 135 / 8772973 = 25,1 \text{ МПа}; \quad (4.6)$$

$$\tau = Q / (t_w h_w) = 2071,7 \cdot 10 / (270 \cdot 2) = 38,4 \text{ МПа}. \quad (4.7)$$

Коэффициенты влияния трещины длиной $\bar{l}_{\text{тр}} = 0,200$ на устойчивость стенки определяются интерполяцией по Таблица 2.8 в зависимости от $\bar{\lambda}_{w,\text{тр}}$: $c_{1,\text{тр}} = 0,945$ и $c_{2,\text{тр}} = 0,930$.

Подставляя полученные значения в формулу (2.13), получаем:

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{1,\text{тр}} \sigma_{cr,ef}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{2,\text{тр}} \tau_{cr,ef}} \right)^2} = \frac{1}{1} \sqrt{\left(\frac{25,1}{0,945 \cdot 366,2} \right)^2 + \left(\frac{38,4}{0,930 \cdot 270,1} \right)^2} = 0,169 < 1, \quad (4.8)$$

следовательно, местная устойчивость стенки обеспечена.

Интерполяцией из Таблиц 3.9 – 3.10 определяем коэффициенты влияния трещины: $c_{f,\text{тр}} = 0,899$ и $c_{w,\text{тр}} = 0,857$. Подставляя полученные значения в формулы (3.1) и (3.2):

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x = \frac{6973,7 \cdot 1000}{0,899 \cdot 8772973 \cdot 311,8 \cdot 1} \times$$

$$\times 128,2 + \frac{841,8 \cdot 1000}{4836070 \cdot 311,8 \cdot 1} 129,9 = 0,436 < 1; \quad (4.9)$$

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} = \frac{2071,7 \cdot 38471,8 \cdot 10}{0,857 \cdot 8772973 \cdot 2,0 \cdot 180,8 \cdot 1} = 0,293 < 1, \quad (4.10)$$

таким образом, прочность подкрановой балки с усталостной трещиной обеспечена.

По результатам расчетов выявлено, что несущая способность стенки снижается до 16,7%, сжатого пояса до 11,2%, устойчивость стенки снижается до 6,4%. Основным элементом, определяющим несущую способность балки в рассматриваемом сечении, является сжатый пояс ($K_{исп} = 0,436$), резервы его несущей способности намного ниже резервов стенки. Прочность рассматриваемой подкрановой балки с трещиной остается обеспеченной за счет запасов, заложенных при ее проектировании.

Аналогичным образом определим снижение несущей способности остальных поврежденных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке. Результаты расчетов балок сведены в Таблицы 4.7 – 4.9.

Таблица 4.7. Сводная таблица расчетов подкрановых балок с усталостными трещинами в верхней зоне стенки (начало)

№ п/п	Тип сечения	$\bar{l}_{тр}$	$\bar{\lambda}_w$	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$	Снижение устойчивости стенки, формула (3.3)	$c_{f,тр}$	$c_{w,тр}$	Снижение прочности сжатого пояса по норм. напряжениям, формула (3.1)	Снижение прочности стенки по касат. напряжениям, формула (3.2)
1	БК12	0,200	5,252	5,321	0,945	0,930	6,4%	0,899	0,857	11,2%	16,7%
2	БК12	0,400	5,252	5,321	0,912	0,905	10,1%	0,858	0,819	16,6%	22,1%
3	БК17	0,103	3,866	3,917	0,980	0,943	5,0%	0,950	0,942	5,2%	6,2%

Таблица 4.8. Сводная таблица расчетов подкрановых балок
с усталостными трещинами в верхней зоне стенки (продолжение)

№ п/п	Тип сечения	$\bar{l}_{тр}$	$\bar{\lambda}_w$	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$	Снижение устойчивости стенки, формула (3.3)	$c_{f,тр}$	$c_{w,тр}$	Снижение прочности сжатого пояса по норм. напряжениям, формула (3.1)	Снижение прочности стенки по касат. напряжениям, формула (3.2)
4	БК14	0,413	3,093	3,133	0,924	0,834	19,7%	0,879	0,880	13,7%	13,6%
5	БК17	0,157	3,866	3,917	0,970	0,914	8,1%	0,925	0,912	8,1%	9,7%
6	БК17	0,047	3,866	3,917	0,991	0,974	1,7%	0,978	0,974	2,3%	2,7%
7	БК17	0,060	3,866	3,917	0,988	0,967	2,1%	0,971	0,966	3,0%	3,5%
8	БК17	0,533	3,866	3,917	0,895	0,840	19,0%	0,861	0,853	16,1%	17,3%
9	БК17	0,237	3,866	3,917	0,954	0,871	11,3%	0,886	0,867	12,8%	15,3%
10	БК17	0,127	3,866	3,917	0,975	0,931	6,7%	0,939	0,929	6,5%	7,7%
11	БК17	0,133	3,866	3,917	0,974	0,927	6,9%	0,936	0,925	6,9%	8,1%
12	БК2	0,160	4,202	4,257	0,964	0,919	8,6%	0,922	0,903	8,4%	10,7%
13	БК2	0,040	4,202	4,257	0,991	0,980	1,6%	0,981	0,976	2,0%	2,5%
14	БК2	0,105	4,202	4,257	0,976	0,947	4,1%	0,949	0,937	5,4%	6,8%
15	БК1	0,150	3,501	3,547	0,976	0,911	6,5%	0,929	0,922	7,7%	8,4%
16	БК3	0,085	4,202	4,257	0,981	0,957	2,4%	0,959	0,949	4,3%	5,4%
17	БК2	0,220	4,202	4,257	0,951	0,889	12,4%	0,893	0,867	12,0%	15,3%
18	БК2	0,145	4,202	4,257	0,967	0,927	5,9%	0,929	0,912	7,6%	9,6%
19	БК2	0,280	4,202	4,257	0,938	0,871	14,7%	0,876	0,849	14,1%	17,8%
20	БК2	0,155	4,202	4,257	0,965	0,922	4,3%	0,925	0,906	8,2%	10,3%

Таблица 4.9. Сводная таблица расчетов подкрановых балок
с усталостными трещинами в верхней зоне стенки (окончание)

№ п/п	Тип сечения	$\bar{l}_{тр}$	$\bar{\lambda}_w$	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$c_{1,тр}$	$c_{2,тр}$	Снижение устойчивости стенки, формула (3.3)	$c_{f,тр}$	$c_{w,тр}$	Снижение прочности сжатого пояса по норм. напряжениям, формула (3.1)	Снижение прочности стенки по касат. напряжениям, формула (3.2)
21	БК2	0,297	4,202	4,257	0,935	0,870	14,9%	0,875	0,849	14,2%	17,8%
22	БК1	0,127	3,501	3,547	0,980	0,925	7,5%	0,940	0,935	6,4%	7,0%
23	БК2	0,113	4,202	4,257	0,975	0,943	5,9%	0,945	0,932	5,8%	7,3%
24	БК2	0,400	4,202	4,257	0,917	0,861	15,8%	0,869	0,848	15,1%	17,9%
25	БК2	0,100	4,202	4,257	0,978	0,949	4,0%	0,951	0,940	5,1%	6,4%
26	БК2	0,227	4,202	4,257	0,949	0,885	12,8%	0,890	0,863	12,4%	15,9%
27	БК2	0,180	4,202	4,257	0,960	0,909	7,6%	0,912	0,891	9,6%	12,2%
28	БК2	0,147	4,202	4,257	0,967	0,926	7,9%	0,929	0,911	7,7%	9,7%
29	БК3	0,250	4,202	4,257	0,944	0,874	10,2%	0,878	0,849	13,8%	17,8%
30	БК2	0,205	4,202	4,257	0,954	0,896	11,5%	0,900	0,876	11,1%	14,1%
31	БК2	0,130	4,202	4,257	0,971	0,934	6,7%	0,937	0,922	6,8%	8,5%
32	БК2	0,220	4,202	4,257	0,951	0,889	8,6%	0,893	0,867	12,0%	15,3%
33	БК1	0,413	3,501	3,547	0,920	0,843	18,4%	0,875	0,868	14,3%	15,2%
34	БК2	0,480	4,202	4,257	0,902	0,854	17,0%	0,863	0,847	15,8%	18,0%
35	БК2	0,420	4,202	4,257	0,913	0,859	16,2%	0,867	0,848	15,3%	18,0%

По результатам расчетов, выполненных по разработанной методике, выявлено, что несущая способность сжатых поясов поврежденных подкрановых балок снижается до 16,6%, стенок до 22,1%. Предварительные поверочные расчеты

рассматриваемых балок показали, что до появления трещин коэффициенты использования верхнего сжатого пояса находились в диапазоне 0,40...0,73, стенки – 0,39...0,62. Учитывая влияние трещин эти коэффициенты составили до 0,88 – сжатого пояса и до 0,80 – стенки, следовательно, на момент исследований поврежденные подкрановые балки не находились в предельном состоянии, что согласуется с результатами наблюдений. Во всех рассматриваемых подкрановых балок прочность оказывается обеспеченной за счет запасов несущей способности, заложенных при проектировании. При этом заметим, что основным элементом, определяющим прочность подкрановой балки с трещиной, является **сжатый пояс**.

Также за продолжительный период мониторинга эксплуатируемых подкрановых балок с трещинами было выявлено, что во многих случаях после их обнаружения рост трещин замедлялся, и в то же время, как уже упоминалось, предельные состояния в виде исчерпания несущей способности стенки или сжатого пояса, фактически определяющего прочность балки, не наступали.

Таким образом можно констатировать, что предложенная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке согласуется с материалами продолжительного мониторинга, что подтверждает ее достоверность.

4. 2. Натурные испытания подкрановых балок с трещинами

А. А. Железнова и И. И. Крылова

4. 2. 1. Описание и методика проведения испытаний

Железнов Афанасий Афанасьевич под руководством Крылова Иосифа Иосифовича проводил экспериментальные исследования на базе Новосибирской государственной академии строительства (в настоящее время Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет – Сибстрин) [34]. В работе исследовалось влияние трещин на местную устойчивость стенки и на увеличение действующих нормальных и касательных напряжений в поясах и стенке соответственно. Были изготовлены и испытаны при различных режимах

загружений, положениях и длинах трещин 4 типоразмера моделей подкрановых балок с сечением в виде сварных равнополочных двутавров (см. Таблицу 4.10), имитация трещины осуществлялась в виде отсутствия части сварного шва между сжатым поясом и стенкой, длина «трещины» изменялась в интервале $0,5 \div 2,0 a_{\text{отс}}$, материал балок – сталь ВСтЗсп5-1 (аналог класса С255 по актуальным техническим условиям на прокат для стальных конструкций [101]), $R_y = 240$ МПа.

Таблица 4.10. Геометрические характеристики испытываемых балок

Марка балки	Эскиз балки	Размеры сечения, мм		$\lambda_w = h_w / t_w$	$\bar{\lambda}_w = \lambda_w \sqrt{R_y / E}$
		поясов	стенки		
Б1-1 Б1-2		– 200х12	– 600х5	120	4,10
Б2-1 Б2-2 Б2-3 Б2-4		– 200х12	– 600х5	120	4,10
Б3		– 200х12	– 500х5	100	3,41
Б4		– 200х12	600х5	120	4,10

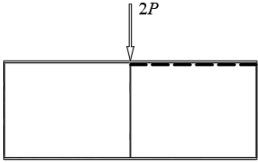
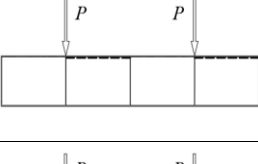
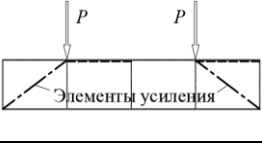
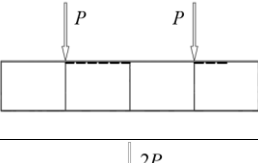
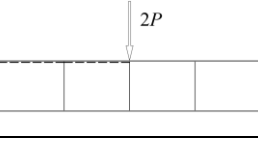
Двухотсечная балка Б1-1 испытывалась на преимущественное воздействие поперечной силы в отсеке с трещиной, Б1-2 на действие локальной нагрузки, в обеих балках длина трещины $l_{\text{тр}} = a_{\text{отс}}$. Четырехотсечная балка Б2-1 испытывалась в несколько этапов: средний отсек с трещиной (2-й) на действие только изгибающих моментов (чистый изгиб), опорный отсек с трещиной (4-й) на преимущественное действие поперечной силы, в обоих отсеках длина трещины $l_{\text{тр}} = a_{\text{отс}}$. Балка Б2-2 испытывалась по аналогичной схеме, что и Б2-1, отличие состояло в том, что длина трещины в опорном отсеке с положением у опорного

ребра составляла $l_{тр} = 0,5 a_{отс}$. В Б2-3 трещина была во 2-м и 3-м отсеках, таким образом общая длина трещины составляла $l_{тр} = 2 a_{отс}$, испытание проводилось только при действии изгибающих моментов, напряжения в сжатом поясе не фиксировались. В Б2-4 трещина была в 1-м и 2-м отсеках, нагрузка прикладывалась посередине балки, испытание проходило в несколько этапов: сначала нагрузка прикладывалась до достижения значительных перемещений в опорном отсеке (определялась критическая нагрузка в опорном отсеке), нагрузка снималась, и трещина в опорном отсеке заваривалась (таким образом в опорном отсеке восстанавливалось сечение балки), загрузка балки продолжалось с трещиной во 2-м отсеке с длиной $l_{тр} = a_{отс}$. Испытание балки Б3 проходило по аналогии с Б2-4, отличие состояло в разности высот стенки (следовательно, и в ее гибкости). Испытания Б2-4 и Б3 проводились для оценки влияния трещин на работу стенки при совместном воздействии изгибающих моментов и поперечных сил. Балка Б4 испытывалась в несколько этапов на действие локальной нагрузки, длина трещины $l_{тр} = (1 \div 1,5) a_{отс}$.

Основной задачей экспериментальных исследований было выявление качественного и количественного снижения устойчивости стенки с трещиной. Критические параметры устойчивости стенки определялась по критерию ограничения перемещений стенки из плоскости, и фиксировались, когда тангенс угла наклона кривой деформативности составлял 1-1,5% от первоначального. Как уже отмечалось в настоящем исследовании, выпучившаяся стенка продолжает нести нагрузку, расчетные критические параметры устойчивости стенки с трещиной фактически определяются не перемещениями стенки, а несущей способностью всего сечения и сжатого пояса, как определяющего прочность балки, поэтому в сравнении данные натурных исследований устойчивости не рассматриваются. В сравнение включены только те эксперименты, в которых исследовалось изменение напряженно-деформированного состояния поврежденных балок и приведены все необходимые данные для теоретического расчета (в том числе: сечение балки, параметры трещин, материал балки и пр.). Модели балок марок Б1-1, Б2-1, Б2-2, Б2-4 соответствуют расчетным положениям,

изложенным в главе 3, и поэтому выбраны для верификации методики расчета прочности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке. Схемы нагружений выбранных моделей балок приведены в Таблице 4.11.

Таблица 4.11. Схемы нагружений испытываемых балок

Марка балки	Этапы испытаний			
	1	2	3	4
Б1-1				
Б2-1				
Б2-2				
Б2-4				

Помимо экспериментальных исследований автор приводит в работе результаты численных расчетов в программном комплексе, реализующем метод конечных элементов, и сравнение полученных результатов с экспериментальными исследованиями. Схемы нагружений и параметры расчетных моделей в работе принимались идентичными экспериментальным.

Испытание моделей балок марки Б1-1 при воздействии одной сосредоточенной силы проводилось на стандартном 200-тонном прессе, остальные марки испытывались на специальном испытательном стенде (см. Рисунок 4.18). Нагружение осуществлялось домкратом, нагрузка передавалась на балки через систему тяжей и траверсу. Общая устойчивость балки обеспечивалась закреплениями опорных сечений и наличием тормозного настила. В приведенных экспериментальных исследованиях балки испытывались статической нагрузкой, влияние динамических воздействий в работе не учитывается. Передача давления от домкрата на неопорные сечения балки осуществлялось через рельс, уложенный на

верхний (сжатый) пояс балки, что в целом соответствует реальному режиму нагрузки подкрановых балок. Загружение балок выполнялось ступенями, по $0,1P_{кр}$, где $P_{кр}$ определялось по отечественным нормам проектирования [101] для соответствующих балок без трещины.

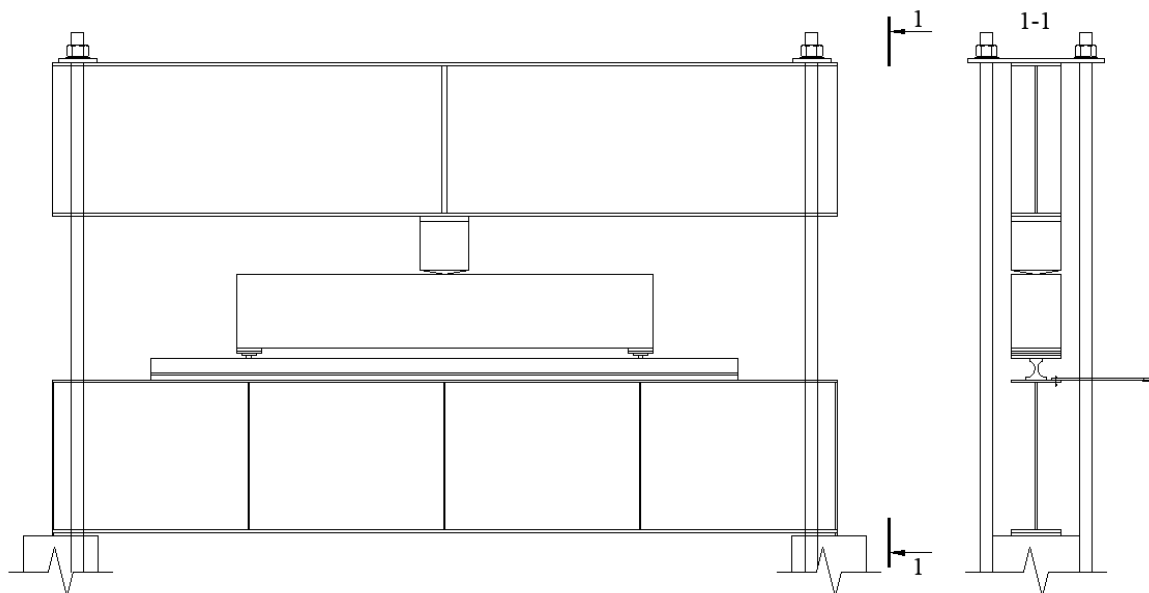


Рисунок 4.18. Схема установки для испытаний

Для анализа напряженно-деформированного состояния на выделенных моделях балок на стенку и пояса наклеивались тензорезисторы (схему размещения см. Рисунок 4.19). Использовались тензодатчики с базой 5 мм, что в совокупности позволило оценить характер перераспределения напряжений между элементами балки в сечениях с трещиной по сравнению с эталонными сечениями.

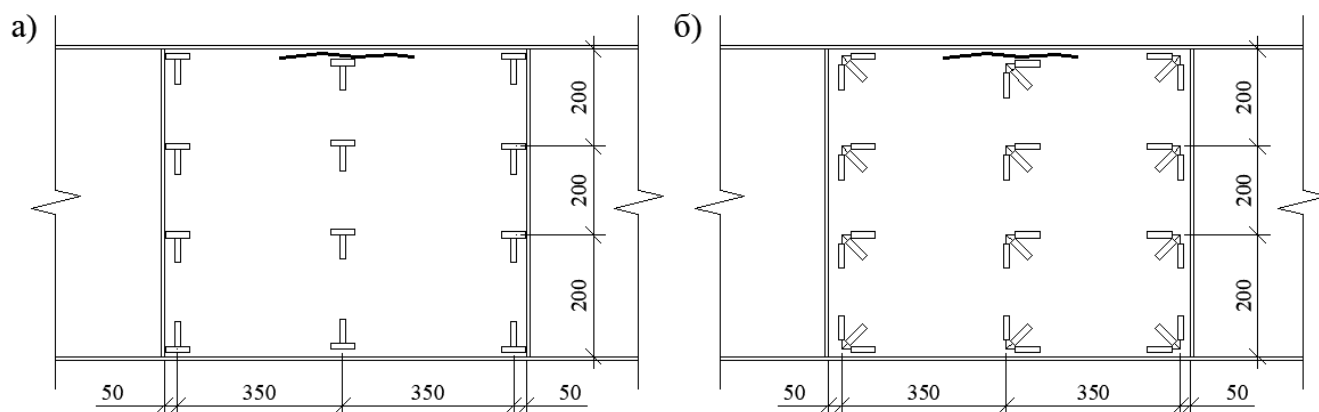


Рисунок 4.19. Схема размещения тензорезисторов: а) при действии изгибающего момента; б) при действии поперечной силы

Относительные деформации фиксировались в автоматизированном тензометрическом комплексе К-732 и пересчитывались в напряжения по

специальной методике с помощью программы «SUPERCALC-4». Деформации определялись после приложения нагрузки $P = (100 \div 200)$ кН. Значение нагрузки принято таким, что в исследуемых балках не наступает предельное состояние в виде потери местной устойчивости стенки или достижения пределов текучести в элементах балок.

Начальные несовершенства и дефекты в виде перегиба пояса, эксцентриситета рельса, его крепления к балкам и пр. в экспериментальном исследовании не учитывались.

4. 2. 2. Сравнительный анализ теоретических результатов с данными натурного эксперимента

В приведенном исследовании анализ влияния трещин на изменение несущей способности подкрановых балок проводился путем сравнения абсолютных значений нормальных и касательных напряжений в сечении с трещиной и без нее по схемам загрузок (см. Таблицу 4.5), результаты испытаний представлялись в размерных величинах (МПа). Напряжения фиксировались при нагрузке, при составляющей не более 50% от предельной нагрузки, при которой максимальные напряжения в балке достигали предела текучести. Напряжения во всех случаях балок фиксировались в середине отсека.

Для сравнения результатов натурного эксперимента и приведенной в главе 3 методики оценки прочности элементов подкрановой балки с трещиной, теоретические значения нормальных и касательных напряжений вычислим по формулам:

$$\sigma_{f, \text{теор}} = \frac{M}{c_{f, \text{тр}} I_x} y; \quad (4.11)$$

$$\tau_{\max, \text{теор}} = \frac{Q S^{1/2}}{c_{w, \text{тр}} I_x t_w}, \quad (4.12)$$

где M и Q – соответственно изгибающие моменты и поперечные силы, действующие в рассматриваемых сечениях, которые определялись по эпюрам

внутренних усилий, построенным согласно схемам загрузок из Таблицы 4.5. При этом в формулах (4.11) и (4.12) понижающие коэффициенты $C_{f,тр}$, $C_{w,тр}$ показывают фактическое снижение несущей способности рассматриваемого сечения с трещиной, и не описывают законы распределения напряжений по высоте сечения (характерные эпюры показаны на Рисунке 4.20).

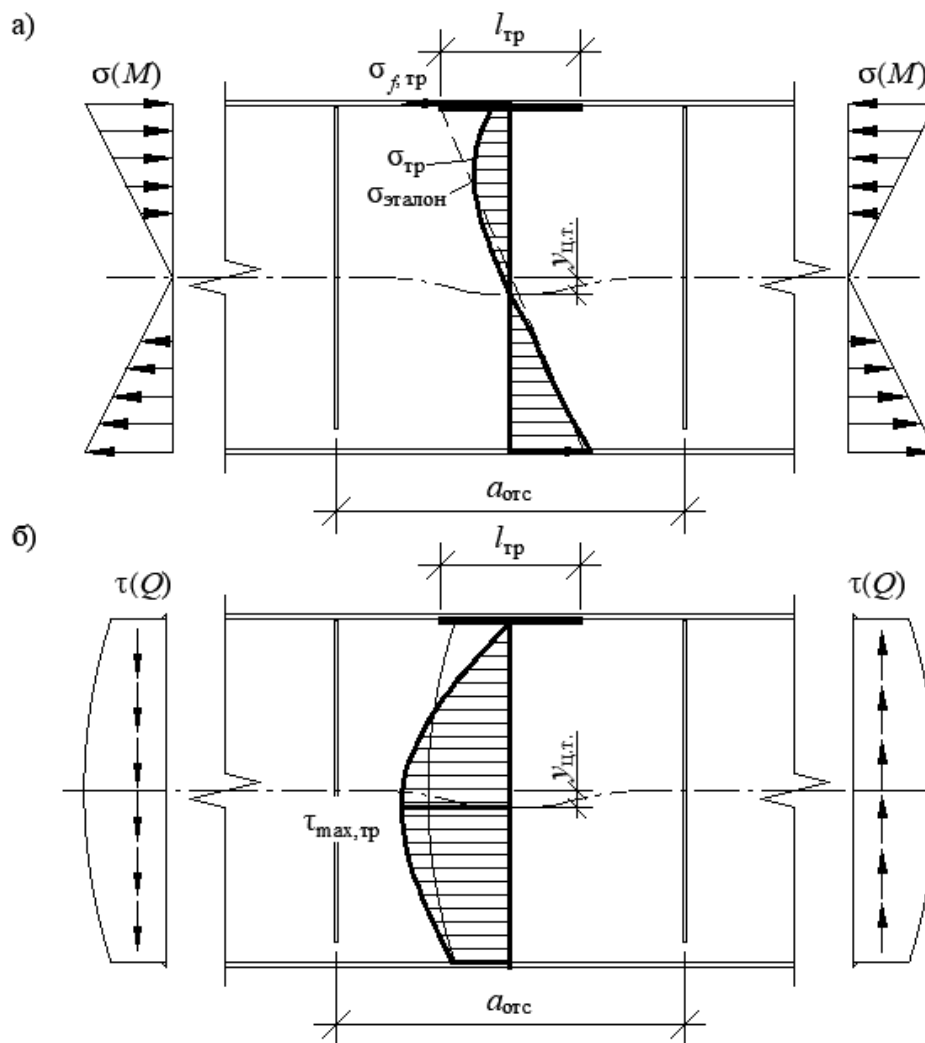


Рисунок 4.20. Характерное напряженно-деформированное состояние в сечении с трещиной:
а) от действия изгибающего момента; б) от действия поперечной силы

Влияние трещины на изменение напряженно-деформированного состояния балок в указанном исследовании определялось без учета несовершенств пояса при чистом изгибе и сдвиге. Поэтому при сравнительном анализе далее $C_{f,тр}$ и $C_{w,тр}$ определялись как обратные значения относительных параметров напряжений из Таблиц 3.1 и 3.6. Результаты сравнения средних нормальных напряжений в сжатом поясе и максимальных касательных напряжений в стенке, полученных по

результатам эксперимента и вычисленных по разработанной методике расчета прочности подкрановой балки с трещиной сведены в Таблицы 4.12 – 4.14.

Таблица 4.12. Результаты сравнения средних нормальных напряжений в сжатом поясе

Марка балки	P, кН	M, кНм	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$\bar{l}_{тр}$	Средние нормальные напряжения в сжатом поясе		$\frac{\sigma_{f,эксп} - \sigma_{f,теор}}{\sigma_{f,эксп}}$
					$\sigma_{f,эксп},$ МПа	$\sigma_{f,теор},$ МПа	
Б2-1	175	144	4,73	0	78,2	79,4	-1,5%
Б2-1	175	144	4,73	1	91,4	91,5	-0,1%
Увеличение напряжений					+17%	+15%	
Б2-2	200	160	4,73	0	92,9	90,7	2,3%
Б2-2	200	160	4,73	1	103,0	104,5	-1,5%
Увеличение напряжений					+11%	+15%	
Б2-4	150	180	4,73	0	100,4	102,1	-1,7%
Б2-4	150	180	4,73	1	116,5	117,6	-0,9%
Увеличение напряжений					+16%	+15%	

Таблица 4.13. Результаты сравнения максимальных касательных напряжений в стенке (начало)

Марка балки	P, кН	Q, кНм	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$\bar{l}_{тр}$	Максимальные касательные напряжения в стенке		$\frac{\tau_{max,эксп} - \tau_{max,теор}}{\tau_{max,эксп}}$
					$\tau_{max,эксп},$ МПа	$\tau_{max,теор},$ МПа	
Б1-1	100	100	4,73	0	34,7	35,6	-2,5%
Б1-1	100	100	4,73	1	41,2	42,3	-2,8%
Увеличение напряжений					+19%	+19%	

Таблица 4.14. Результаты сравнения максимальных касательных напряжений в стенке (окончание)

Марка балки	P, кН	Q, кНм	$\bar{\lambda}_{w,тр}$	$\bar{l}_{тр}$	Максимальные касательные напряжения в стенке		$\frac{\tau_{max,эксп} - \tau_{max,теор}}{\tau_{max,эксп}}$
					$\tau_{max,эксп},$ МПа	$\tau_{max,теор},$ МПа	
Б2-4	150	150	4,73	0	52,2	53,3	-2,2%
Б2-4	150	150	4,73	1	58,5	63,5	-8,6%
Увеличение напряжений					+12%	+19%	

Анализируя результаты сравнений, можно сделать вывод о том, что предложенная методика расчета прочности подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке хорошо согласуется с данными натурного эксперимента, в среднем разница по напряжениям не превысила 3%, и в 100% случаев теоретические напряжения больше экспериментальных.

Учитывая изложение, сравнение результатов теоретического расчета по разработанной методике с данными натурного эксперимента указывает на ее достоверность.

4. 3. Выводы по четвертой главе

1. Сравнение разработанной методики расчета с экспериментальным исследованием эксплуатируемых подкрановых балок с трещинами, выполненным ООО «НИПИ «ЭРКОН», показало хорошую согласованность, расхождение по напряжениям не превышает 5,6%.

2. Анализ материалов мониторинга эксплуатируемых балок с трещинами наибольшей протяженности выявил, что на момент наблюдения несущая способность их сжатых поясов снизилась до 16,6%, а стенок – до 22,1%. Результаты теоретических исследований показали: прочность поврежденных подкрановых балок обеспечивается за счет запасов, заложенных при проектировании, что подтверждается результатами мониторинга.

3. Сравнение результатов расчета по предложенной методике с данными испытаний моделей подкрановых балок с трещинами Железнова А. А. также продемонстрировало ее достоверность. Разница теоретических и экспериментальных напряжений в среднем не превышает 3%. При этом в 100% случаев теоретические напряжения больше экспериментальных, что показывает небольшие запасы, заложенные в разработанной методике.

Таким образом, сопоставления полученных теоретических результатов с данными натурных испытаний и имеющимися материалами продолжительного мониторинга показали достоверность разработанного метода определения напряженно-деформированного и предельного состояния подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по результатам выполненного исследования:

1. Разработаны численная модель и метод расчета подкрановой балки с горизонтальной усталостной трещиной в стенке, позволяющие определить ее напряженно-деформированное состояние и запредельное поведение поврежденной стенки. При этом учитывалось влияние изначальных геометрических несовершенств балки.

2. Получены зависимости снижения несущей способности стенки и сжатого пояса подкрановой балки с усталостной трещиной от следующих параметров: условной гибкости стенки, длины и положения трещины в отсеке. С целью практического применения результаты расчетов представлены в относительных параметрах.

3. Исследовано влияние усталостной трещины в стенке на снижение ее расчетных критических напряжений:

- нормальные напряжения снижаются от 3,5% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ до 8,5% – с $\bar{l}_{тр} = 1,00$. При этом развитие трещины сопровождается перераспределением напряжений в стенке, приводящем к увеличению усилий в сжатом поясе;

- касательные напряжения также снижаются от 13,5% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ до 22,7% при $\bar{l}_{тр} = 1,00$.

4. Наличие горизонтальных трещин в стенке приводит к увеличению напряжений в подкрановой балке:

- при действии изгибающего момента нормальные напряжения в сжатом поясе возрастают от 15,9% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ до 24,7% при $\bar{l}_{тр} = 1,00$;

- при действии поперечной силы наблюдается возрастание касательных напряжений в стенке от 18,2% при трещине длиной $\bar{l}_{тр} = 0,25$ до 31,3% при $\bar{l}_{тр} = 1,00$.

5. Разработана инженерная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке на прочность, в которой влияние трещины учитывается соответствующими понижающими коэффициентами:

$$\frac{M_x}{c_{f,тр} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x \leq 1;$$

$$\frac{QS}{c_{w,тр} I_x t_w R_s \gamma_c} \leq 1;$$

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{1,тр} \sigma_{cr,ef}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{2,тр} \tau_{cr,ef}} \right)^2} \leq 1,$$

где $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$ – коэффициенты, которые учитывают влияние трещины на перераспределение напряжений в балке; $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ – коэффициенты влияния трещины на устойчивость стенки и зависящие от относительной длины трещины $\bar{l}_{тр}$, ее положения в отсеке и гибкости стенки $\bar{\lambda}_{w,тр}$.

6. Разработана методика определения предельной длины трещины $[\bar{l}_{тр}]$, при которой наступает предельное состояние подкрановой балки. Предложены рекомендации по определению срока временной эксплуатации поврежденных подкрановых балок.

7. Показано, что введение в конструкцию дополнительных элементов, усиливающих сжатый пояс, эффективно отражается на повышении несущей способности подкрановой балки с трещинами.

8. Сопоставление полученных теоретических результатов с данными натурных испытаний и имеющимися материалами продолжительного мониторинга показали достоверность разработанного метода определения напряженно-деформированного и предельного состояния подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

На основе разработанного в настоящей диссертации метода определения напряженно-деформированного и предельного состояния подкрановых балок с

усталостными трещинами в стенке, **перспективами дальнейшей разработки темы** могут являться:

- исследование работы элементов поврежденного отсека при давлении колеса крана непосредственно в зоне с трещиной;
- исследование влияния трещины в стенке подкрановой балки на перераспределение изгибных усилий в плоскости тормозной конструкции;
- разработка эффективных способов усиления подкрановых балок с усталостными трещинами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюхов, В. Н. О состоянии подкрановых конструкций корпуса конверторного производства ОАО «Северсталь» / В. Н. Артюхов, Е. А. Щербаков, В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // Промышленное и гражданское строительство. – М.: Издательство ПГС, 2001. – № 6. – С. 31–34.
2. Бабкин, В. И. К вопросу долговечности сварных подкрановых балок / В.И. Бабкин, К.Е. Жидков, Н.В. Капырин, А.В. Мерзликин // Вестник Липецкого государственного технического университета. – Липецк: ЛГТУ, 2016. – №1 (27). – С. 46–49.
3. Бабкин, В. И. Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжелого режима работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В. И. Бабкин; ЦНИИПСК. – М., 1986. – 163 с.
4. Баженов, В. А. Моделирование нелинейного деформирования и потери устойчивости упругих неоднородных оболочек / В. А. Баженов, Н. А. Соловей, О. П. Кривенко, О. А. Мищенко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – М.: РУДН, 2014. – № 5. – С. 14–33.
5. Балдин, В. А. О причинах преждевременного выхода из строя подкрановых балок и вопросы улучшения их конструкции / В. А. Балдин // Промышленное строительство. – М., 1966. – № 10. – С. 20–22.
6. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
7. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К.А. Басов. – Саратов.: Профобразование, 2017. – 239 с.
8. Беленя, Е. И. Полнее использовать резервы прочности конструкций реконструируемых производственных зданий с металлическим каркасом / Е. И. Беленя, В. Н. Валь, Б. Ю. Уваров // Промышленное строительство. – М, 1986. – №5. – С. 2-4.

9. Белый, Г. И. Влияние геометрических несовершенств сжатого пояса на несущую способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке / Г. И. Белый, А. Е. Кубасевич // Вестник гражданских инженеров. – СПб.: СПбГАСУ, 2022. № 3 (93).
10. Белый, Г. И. Несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке / Г. И. Белый, А. Е. Кубасевич // Вестник гражданских инженеров. – СПб.: СПбГАСУ, 2022. № 2 (92). С. 24-29.
11. Белый, Г. И. Причины снижения надежности и приближенная оценка ресурса стальных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / Г. И. Белый // Современные проблемы науки и образования – М.: ООО "Издательский дом "Академия естествознания", 2012. – № 2. – С. 264–271.
12. Белый, Г. И. Проблемы расчетной оценки технического состояния металлических конструкций зданий и сооружений / Г. И. Белый // Реконструкция Санкт-Петербург: международная научно-практическая конференция: сб. докл. – СПб.:СПбГАСУ, 2005. – Ч. 1. – С. 70–73.
13. Беляев, Б. И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б. И. Беляев, В. С. Корниенко. – М.: Стройиздат, 1968. – 209 с.
14. Бирюлев, В. В. Анализ технического состояния конструкций производственных зданий и пути повышения их надежности (на примере Сибирского региона) / В. В. Бирюлев, И. И. Крылов, В. А. Чумаков // Реконструкция промышленных зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1988.
15. Броуде, В. М. Устойчивость пластинок в элементах стальных конструкций / В. М. Броуде. – Л.: Машстройиздат, 1949. – 240 с.
16. Бруйка, В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруйка [и др.]. – Самара.: СГТУ, 2010. – 271 с.
17. Васюта, Б. Н. К вопросу определения параметров остаточного ресурса сварных подкрановых балок с усталостными повреждениями / Б.Н. Васюта, И.И. Крылов, С.С. Кукушко // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2006. – № 6. С. 114–120.

18. Васюта, Б. Н. Некоторые особенности развития усталостных трещин в верхней зоне стенки сварных подкрановых балок / Б. Н. Васюта // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2003. – № 10. С. 4–13.
19. Васюта, Б. Н. О тенденциях и противоречиях развития подкрановых конструкций / Б. Н. Васюта, Г. В. Чалков // Монтажные и специальные работы в строительстве. – М.: Редакция журнала "Механизация строительства", 2007. – № 4.
20. Васюта, Б. Н. Об эмпирической зависимости для скорости роста усталостных трещин в верхней зоне стенки подкрановой балки / Б. Н. Васюта // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2004. – № 8. С. 4–11.
21. Васюта, Б. Н. Уроки одной аварии / Б. Н. Васюта // Проектирование и строительство в Сибири. – Новосибирск: ООО "Строительные ведомости", 2001. – № 2. – С. 24–25.
22. Веселов, В. В. Оценка работоспособности эксплуатируемых стальных подкрановых балок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В. В. Веселов; ПГУПС. – СПб, 2005. – 267 с.
23. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
24. Горпинченко, В. М. Разработка метода расчета на выносливость и создание надежных и эффективных конструкций балок для подвижной нагрузки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / В. М. Горпинченко; ЦНИИСК. – М., 1983. – 328 с.
25. ГОСТ 23118-2019 Конструкции стальные строительные. Общие технические условия. Изд. официальное. – М.: Стандартинформ, 2020. – 40 с.
26. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.
27. ГОСТ 27772-2015 Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 30 с.

28. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2014. – 59 с.
29. ГОСТ 4121-96 Рельсы крановые. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 9 с.
30. Давиденко, А. И. Определение несущей способности стальной подкрановой балки по критерию трещиностойкости методом математического моделирования / А.И. Давиденко, П.Н. Кирьязов, Н.Д. Высоцкая // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – Ялта: ООО "Межрегиональный институт развития", 2017. – №10 (173). – С. 36–44.
31. Емельянов, О. В. Изучение влияния величины сжимающей части цикла знакопеременного циклического нагружения на рост усталостных трещин / Промышленное и гражданское строительство. – М.: Издательство ПГС, 2009. – № 7. – С. 29–30.
32. Еремин, К. И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / К. И. Еремин; МГСУ. – Магнитогорск, 1996. – 45 с.
33. Еремин, К. И. Повреждаемость подкрановых балок предприятий металлургической и горно-рудной промышленности / К.И. Еремин, М.В. Нащекин, К.В. Марков, А.Г. Горбунов // Наука и безопасность. – М.: НИИ "Промышленная безопасность", 2015. – № 3 (16). – С. 59–77.
34. Железнов, А. А. Местная устойчивость стенок сварных подкрановых балок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. А. Железнов; НГАС. – Новосибирск, 1996. – 144 с.
35. Закревский, М. П. Анализ предельных состояний подкрановых балок / Закревский М. П., Москвичев В. В., Котельников В. С., Черняев А. П., Чабан Е. А. // Безопасность труда в промышленности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2004. – № 3. – С. 31–33.
36. Ильященко, А. В. Несущая способность тонкостенных стержней, обладающих начальными погибями при учете местной потери устойчивости:

- дис. ... канд. техн. наук: 01.02.03 / А. В. Ильященко; МИСИ. – М., 1984. – 256 с.
37. Карев, М. А. Новая стальная подкрановая конструкция. Методы расчета прочности и выносливости: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М. А. Карев; ПГАСА. – Пенза, 2002. – 195 с.
 38. Кикин, А. И. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А. И. Кикин [и др.] – М.: Стройиздат, 1984. – 304 с.
 39. Кикин, А. И. Результаты обследования подкрановых конструкций, запроектированных по действующим нормам / А. И. Кикин, Ю. С. Эглескалн // Промышленное строительство. – М., 1968. – № 12. – С. 38–39.
 40. Ким, И. В. Комплексная оценка долговечности сварных разрезных подкрановых балок стохастическими и нейросетевыми методами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / И. В. Ким; МГТУ. – Магнитогорск, 2005. – 227 с.
 41. Крылов, И. И. Живучесть эксплуатируемых подкрановых балок с усталостными повреждениями / И.И. Крылов, В.В. Тарасевич // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 1998. – № 2. С. 17–25.
 42. Крылов, И. И. Из опыта ремонта стальных подкрановых балок с усталостными трещинами / И.И. Крылов, Б.Н. Васюта, А.А. Железнов // Архитектура и строительные конструкции. Тезисы докладов научно-технической конференции. – Новосибирск: НГАС, 1991. – С. 15–16.
 43. Крылов, И. И. К прогнозированию ресурса подкрановых балок с усталостными повреждениями / И.И. Крылов // Реконструкция и совершенствование несущих элементов зданий и сооружений транспорта. сборник научных трудов. Сибирская государственная академия путей сообщения. – Новосибирск: СГАПС, 1997. – С. 24–34.
 44. Крылов, И. И. Классификация методов торможения усталостных трещин в сварных подкрановых балках / И.И. Крылов // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. – Новосибирск: НГАС, 1996. – С. 9–10.

45. Крылов, И. И. Классификация усталостных повреждений подкрановых балок / И.И. Крылов, А.А. Железнов // Тезисы докладов научно-технической конференции. Посвящается 60-летию института. – Новосибирск: НГАС, 1990. – С. 13–14.
46. Крылов, И. И. Местная устойчивость стенок сварных балок при отрыве пояса от стенки / И.И. Крылов, А.А. Железнов // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. Министерство общего и профессионального образования РФ, Новосибирская государственная академия строительства. – Новосибирск: НГАС, 1995. – С. 9–10.
47. Крылов, И. И. Несущая способность стальных подкрановых балок с усталостными трещинами по критерию местной устойчивости / И.И. Крылов, А.А. Железнов // Строительные конструкции и расчет сооружений: тез. докл. на конф. – Новосибирск: НГАС, 1994. – С. 8–9.
48. Крылов, И. И. Оценка несущей способности стальных подкрановых балок по различным критериям / И.И. Крылов, Е.А. Вахтин // Строительные конструкции и расчет сооружений: тез. докл. на конф. – Новосибирск: НГАС, 1994. – С. 7–8.
49. Крылов, И. И. Оценка предельно допустимой длины усталостной трещины в сварных подкрановых балках / И.И. Крылов, Е.А. Вахтин // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. Министерство общего и профессионального образования РФ, Новосибирская государственная академия строительства. – Новосибирск: НГАС, 1995. – С. 7–8.
50. Крылов, И. И. Оценка скорости роста усталостных трещин в подкрановых балках / И.И. Крылов, И.И. Петров // Строительные конструкции и расчет сооружений. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. Новосибирский инженерно-строительный институт им. В. В. Куйбышева. – Новосибирск: НИСИ им. В. В. Куйбышева, 1993. – С. 6–7.
51. Крылов, И. И. Применение иммитационного моделирования для прогноза роста усталостных трещин / И.И. Крылов, В.В. Тарасевич // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. Министерство общего и

- профессионального образования РФ, Новосибирская государственная академия строительства. – Новосибирск: НГАС, 1995. – С. 3–5.
52. Крылов, И. И. Пути увеличения ресурса подкрановых балок / И. И. Крылов // Металлические конструкции (научная информация). Вып. 1. – Киев: Ассоциация кафедр металлических конструкций вузов СНГ, 1993. – С. 92–100.
 53. Крылов, И. И. Работоспособность подкрановых балок с усталостными повреждениями / И.И. Крылов, А.А. Железнов, Е. А. Вахтин // Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого. – М.: МГСУ, 1995. – С. 181–186.
 54. Крылов, И. И. Ресурс сварных подкрановых балок с усталостными трещинами / И.И. Крылов // Реконструкция и совершенствование несущих элементов зданий и сооружений транспорта. – Новосибирск: СГУПС, 1993. – С. 40–43.
 55. Кубасевич, А. Е. Влияние технологических факторов негеометрического характера на появление и развитие усталостных трещин в зоне сжатого пояса подкрановых балок / А. Е. Кубасевич, М. М. Тонаканян // Технология и организация строительного производства. Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции. – СПб: СПбГАСУ, 2021. – С. 252-257.
 56. Кубасевич, А. Е. Работа подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса / А. Е. Кубасевич // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 3 (86). – С. 64-70.
 57. Кубасевич, А. Е. Устойчивость стенок подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса / А. Е. Кубасевич // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4 (81). – С. 47-53.
 58. Кудишин, Ю. И. Ещё раз о локальной выносливости подкрановых балок / Ю. И. Кудишин // Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого. – М.: МГСУ, 1995. – С. 177 - 180.

59. Кудишин, Ю. И. Некоторые особенности работы сварных подкрановых балок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ю. И. Кудишин; МИСИ. – М., 1967. – 148 с.
60. Кудишин, Ю. И. Упругие прокладки под рельсами подкрановых металлических балок / Ю. И. Кудишин // Промышленное строительство. – М., 1969. – № 9. – С. 23 - 24.
61. Кузьмишкин, А. А. Выносливость металлических подкрановых конструкций при тяжелом режиме циклических нагрузжений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. А. Кузьмишкин; ПГАСА. – Пенза, 2006. – 187 с.
62. Кунин, Ю.С. Исследование процессов нагружения стальных подкрановых балок вертикальными крановыми нагрузками в цехах металлургического производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Ю. С. Кунин; МИСИ. – М., 1970. – 15 с.
63. Ларионов, В. В. Вопросы эксплуатации стальных подкрановых балок с усталостными трещинами / В. В. Ларионов, А. И. Складнев, В. И. Бабкин // Промышленное и гражданское строительство. – М, 1986.
64. Ларионов, В. В. Развитие усталостных трещин в подкрановых балках / В. В. Ларионов, В. И. Бабкин // Сб . научных трудов ЦНИИПСК. – М, 1986. – С.23–32.
65. Лаштанкин, А. С. Повышение выносливости подрельсовой зоны подкрановых балок снижением динамики воздействия колес мостовых кранов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. С. Лаштанкин; ПГУАС. – Пенза, 2011. – 20 с.
66. Ли, М. Л. Оценка нагруженности и усталостной долговечности сварных подкрановых балок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / М. Л. Ли; ЮУрГУ. – Челябинск, 2004. – 186 с.
67. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова

- (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). – М.: изд-во АСВ, 1998. – 512 с.
68. Москвичев, В. В. Анализ развития усталостных трещин в подкрановых балках / В.В. Москвичев, Е.А. Чабан // Заводская лаборатория Диагностика материалов. – М.: Тест-зл, 2018. – № 7 (84). С. 47–54.
 69. Москвичев, В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в условиях аварийных ситуаций / В.В. Москвичев, Е.А. Чабан // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – М.: Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2016. – № 5. – С. 3–15.
 70. Москвичев, В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в штатных режимах эксплуатации / В.В. Москвичев, Е.А. Чабан // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – Красноярск: СФУ, 2016. – №9 (4). – С. 572–584 с.
 71. Москвичев, В. В. Несущая способность подкрановых балок в штатных и аварийных условиях эксплуатации / В.В. Москвичев, Е.А. Чабан // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИГУПС, 2018. – №2 (58). – С. 8–18.
 72. Мущанов, В. Ф. Численные исследования местной устойчивости стенок балок составного двутаврового сечения с локальными вмятинами-хлопунами в пролетных строениях мостовых сооружений / В. Ф. Мущанов, А. Н. Миронов, А. А. Коваленко // Металлические конструкции. – Макеевка: ДНАСА, 2017. – № 3 (23). – С. 107– 121.
 73. Нежданов, К. К. Испытания крупномасштабных моделей подкрановых балок подвижными воздействиями колес мостовых кранов на выносливость / К.К. Нежданов, В.А. Туманов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 2004. – № 2 (542). – С. 21–27.
 74. Нежданов, К. К. Исследование выносливости сжатой зоны стенки сварных стальных подкрановых балок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / К. К. Нежданов; МИСИ. – М., 1975. – 19 с.

75. Нежданов, К. К. Конструирование эффективных подкрановых конструкций / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – Астрахань: АГАСУ, 2020. – № 1 (31). – С. 5–8.
76. Нежданов, К. К. Подкрановая балка с повышенным техническим ресурсом эксплуатации / К.К. Нежданов, И.Н. Гарькин // Региональная архитектура и строительство. – Пенза: ПГУАС, 2017. – № 3 (32). – С. 119–122.
77. Нежданов, К. К. Совершенствование подкрановых конструкций и методов их расчета: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / К. К. Нежданов; МИСИ. – М., 1993. – 37 с.
78. Новоселов, А. А. Особенности напряженно-деформированного состояния подкрановых балок с верхним поясом из прокатных тавров: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А. А. Новоселов; СГУПС. – Новосибирск, 2005. – 156 с.
79. ОРД 00 000 89 Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий. – М.: Министерство черной металлургии СССР, 1989. – 55 с.
80. Островский, А.В. Усталостная долговечность элементов металлических конструкций с учетом развития и взаимодействия трещин.: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Островский; . – М, 1990. – 20 с.
81. Патрикеев, А. Б. Некоторые закономерности усталостных повреждений сварных подкрановых балок / А. Б. Патрикеев // Проблемы прочности. – Киев, 1983. – № 7. – С. 19–24.
82. Патрикеев, А. Б. О механизме разрушения верхних участков стальных подкрановых балок / А. Б. Патрикеев // Промышленное строительство. – М., 1971. – № 5. – С. 39–43.
83. Попченков, И. В. Новые профили крановых рельсов. Прочность и долговечность рельсобалочных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / И. В. Попченков; ПГАСА. – Пенза, 2000. – 174 с.
84. Пособие к СНиП II-23-81* Пособие по проектированию усиления стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1989. – 160 с.

85. Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: Сборник документов. Серия 10. Выпуск 7 / Колл. авт. 2-е изд., испр. – М.: Научно-технический центр "Промышленная безопасность", 2009. – 288 с.
86. РД 10-138-97 Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин. Ч. 1 Общие положения. Методические указания. – М.: НПО ОБТ, 1998. – 36 с.
87. РД 11-126-96 Методические рекомендации по организации и осуществлению контроля за обеспечением безопасной эксплуатации зданий и сооружений на подконтрольных металлургических и коксохимических производствах. – М.: Госгортехнадзор России, 1996. – 5 с.
88. РД 50:48:0075.03.05 Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации надземных крановых путей. – М.: ЗАО "НПЦ "Путь К", 2005. – 215 с.
89. Рекомендации по учету влияния дефектов и повреждений на эксплуатационную пригодность стальных конструкций производственных зданий. – М.: ЦНИИпроектстальконструкция им. Мельникова, 1987. – 46 с.
90. Реморов, В. Е. Изучение напряженно-деформированного состояния подкрановых балок при наличии трещин / В.Е. Реморов, Д.С. Бондарь // Машиностроение. – Новокузнецк, 2008. – № 18. – С. 164–168.
91. Руководство по восстановительному ремонту подкрановых конструкций. – М.: Министерство металлургии СССР, 1991. – 118 с.
92. Руководство по эксплуатации строительных конструкций производственных зданий промышленных предприятий. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 92 с.
93. Сабуров, В. Ф. Закономерности усталостных повреждений и разработка метода расчетной оценки долговечности подкрановых путей производственных зданий: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.01 / В. Ф. Сабуров; ЮУрГУ. – Челябинск, 2002. – 40 с.
94. Сергеев, А. В. Влияние особенностей напряженного состояния в подкрановых балках на их прочность и выносливость / А. В. Сергеев, С. Д. Шафрай // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ, 1997. – № 7 (463). – С. 9–12.

95. Сердюк, В. В. Прогнозирование повреждаемости верхней зоны стенки эксплуатируемых сварных подкрановых балок интенсивной нагруженности: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В. В. Сердюк; ЛГТУ. – Липецк, 2005. – 181 с.
96. Серия 1.426.2-7 Выпуск 3. Балки пролетом 6 и 12 м разрезные под краны общего назначения грузоподъемностью до 50 т. Чертежи КМ. – М.: ЦНИИПСК им. Мельникова ФГУП Уралтиппроект, 1989. – 91 с.
97. Складнев, А. И. Трещиностойкость стальных балок при действии циклических, подвижно-циклических и катучих нагрузок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / А. И. Складнев; ЛГТУ. – Липецк, 1999. – 569 с.
98. Складнев, А. И. Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок / А. И. Складнев, В. В. Сердюк // Безопасность труда в промышленности. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2004. – № 11. – С. 34–36.
99. СНиП II-23-81* Нагрузки и воздействия – М.: ФГУП ЦПП, 2005. – 44 с.
100. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
101. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – М.: ФГУП Стандартинформ, 2017. – 146 с.
102. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: ФГУП Стандартинформ, 2018. – 95 с.
103. СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2017. – 167 с.
104. Спирин, Г. М. Исследование работы стальных подкрановых балок для кранов тяжёлого и весьма тяжёлого режимов работы: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Г. М. Спирин; ЛИСИ. – Л. 1978. – 191 с.
105. СТО 22-05-04 Руководство по определению индивидуального ресурса стальных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенках для допущения их временной эксплуатации. Ч. 1. Основные положения. – М.: ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, 2004. – 42 с.

106. СТО 22-15-06 Временные методические указания по техническому надзору за эксплуатацией подкрановых балок с усталостными трещинами в верхней зоне стенки. – Новосибирск: НГАСУ Сибстрин, 2007. – 81 с.
107. Такки, В. Ф. Повышение эксплуатационного ресурса подкрановых балок / В.Ф. Такки, И.Ф. Егоров, О.А. Туснина // Промышленное и гражданское строительство. – М.: Издательство ПГС, 2020. – № 12. – С. 61–67.
108. Тимашев, С. А. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций / С. А. Тимашев. – Свердловск, 1974. – 103 с.
109. Тимошенко, С. П. Устойчивость стержней и оболочек / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1981. 808 с.
110. Тугаев, А. С. Устойчивость пластин и тонкостенных стержней: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.03 / А. С. Тугаев; ХИИКС. – Харьков, 1984. – 149 с.
111. Федорова, Н. Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
112. Фын, Сю-Цзюнь Исследование усталостных повреждений верхней зоны стенок стальных подкрановых балок / Сю-Цзюнь Фын, Синь-Шань Линь, Тиан Фан // Промышленное и гражданское строительство. – М.: Издательство ПГС, 1994. – № 11–12. – С. 33–35.
113. Хаютин, И. Л. О недостатках подкрановых балок / И. Л. Хаютин // Промышленное строительство. – М., 1966. – № 9. – С. 13–15.
114. Чабан, Е. А. Несущая способность подкрановых балок в штатных режимах эксплуатации и аварийных ситуациях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Е. А. Чабан; КГАСА. – Красноярск, 2004. – 148 с.
115. Чалков, Г. В. Напряжения в стенках подкрановых балок повышенного ресурса при местном кручении верхнего пояса: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Г. В. Чалков; НГАСУ (Сибстрин). – Новосибирск, 2012. – 184 с.
116. Чумаков, В. А. Увеличение ресурса эксплуатируемых подкрановых балок путем подкрепления пояса продольными ребрами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / В. А. Чумаков; НИСИ. – Новосибирск, 1987. – 226 с.

117. ЭРД 22-02-99 Руководство по оценке технического состояния стальных подкрановых конструкций. – М.: ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, 2000. – 10 с.
118. Ávila, G. Crane girder fatigue life determination using SN and LEFM methods / G. Ávila, E. Palma, R. De Paula // Engineering Failure Analysis. – Amsterdam: Elsevier BV, 2017. – Vol. 79. – PP. 812–819.
119. Caglayan, O. Fatigue life prediction of existing crane runway girders / Ozden Caglayan, Kadir Ozakgul, Ovunc Tezer, Erdogan Uzgider // Journal of Constructional Steel Research. – Amsterdam: Elsevier BV, 2010. – Vol. 10 (66). – PP. 1164–1173.
120. Castro, J. T. P. Fatigue life prediction of repaired welded structures / J. T. P. Castro, J. L. F. Freire, R. D. Vieira // Journal of Constructional Steel Research. – Amsterdam: Elsevier BV, 1994. – Vol. 2 (28). – PP. 187–195.
121. Dong, S. E., Chen, Q. Probe on the Stress of the Support Crack of Welded Crane Beams / S. E. Dong, Q. Chen // Applied Mechanics and Materials. – Baech: Trans Tech Publications, 2014. – Vol. 501–504. – PP. 710–716.
122. Euler, M. Fatigue action on crane runway beams / Mathias Euler, Colin Taylor // Journal of Constructional Steel Research. – Amsterdam: Elsevier BV, 2021. – Vol. 181, Article 106476. – 15 p.
123. Eurocode 1: Actions on structures – Part 3: Actions induced by cranes and machinery. ENV 1991-3:1998 / European committee for standartization. – Brussels: CEN, 2006. – 49 p.
124. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. ENV 1993-1-1:1992 / European committee for standartization. – Brussels: CEN, 2005. – 93 p.
125. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements. ENV 1993-1-5:1997 / European committee for standartization. – Brussels: CEN, 2006. – 55 p.

126. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 6: Crane supporting structures. ENV 1993-1-6:1999 / European committee for standartization. – Brussels: CEN, 2007. – 97 p.
127. Eurocode: Basis of structural design. ENV 1991-1:1994 / European committee for standartization. – Brussels: CEN, 2002. – 119 p.
128. Graciano, C. Imperfection sensitivity of plate girder webs subjected to patch loading / C. Graciano, E. Casanova, J. Martínez // *Journal of Constructional Steel Research*. – Amsterdam: Elsevier BV, 2011. – Vol. 7 (67). – PP. 1128–1133.
129. Granath, P. I-shaped steel girders subjected to bending moment and travelling patch loading / Per Granath, Anders Thorsson, Bo Edlund // *Journal of Constructional Steel Research*. – Amsterdam: Elsevier BV, 2000. – Vol. 3 (54). – PP. 409–421.
130. Kovacevic, S. Unfavorable geometric imperfections in steel plate girders subjected to localized loads / S. Kovacevic, N. Markovic, D. Sumarac, R. Salatic // *Thin-Walled Structures*. – Amsterdam: Elsevier BV, 2021. – Vol. 161, Article 107412. – 16 p.
131. Krneta, M. calculation of the steel bracket of the crane track / Milan Krneta; UBL. – Banja Luka, 2020. – 147 p.
132. Kulka, J. Analysis of crane track degradation due to operation / Jozef Kulka, Martin Mantic, Gabriel Fedorko, Vieroslav Molnar // *Engineering Failure Analysis*. – Amsterdam: Elsevier BV, 2016. – Vol. 59. – PP. 384–395.
133. Ren, T. Elastic buckling of web plates in I-girders under patch and wheel loading / T. Ren, G. S. Tong // *Engineering Structures*. – Amsterdam: Elsevier BV, 2005. – Vol. 10 (27). – PP. 1528–1536.
134. Rettenmeier, P. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects / Philipp Rettenmeier, Eberhard Roos, Stefan Weihe // *International Journal of Fatigue*. – Amsterdam: Elsevier BV, 2016. – Vol. 82, part 2. – PP. 179–187.
135. Rykaluka, K. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders – Locations, causes and calculations / Kazimierz Rykaluka, Krzysztof Marcinczakb, Sławomir

- Rowiński // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – Amsterdam: Elsevier BV, 2018. – Vol. 1 (18). – PP. 69–82.
136. Wardenier, J. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load / Jaap Wardenier, Peter de Vries, Gerrit Timmerman // Journal of Constructional Steel Research. – Amsterdam: Elsevier BV, 2018. – Vol. 140. – PP. 163–173.
 137. Weidner, P. Zum Ermüdungsverhalten einseitig geschweißter Stumpfstöße von Kreishohlprofilen: dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) / Philipp Weidner; KIT. – Karlsruhe, 2019. – 261 p.
 138. Xie, Yuanmin Anti-fatigue Performance Analysis on Steel Crane Beam / Yuanmin Xie // Sensors and Transducers. – Barcelona: IFSA, 2013. – Vol. 21. – PP. 73–77.
 139. Xu, Bin Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission / Bin Xu, Qi Wu // Engineering Failure Analysis. – Amsterdam: Elsevier BV, 2020. – Vol. 109. – 14 p.
 140. Zai, J. The fatigue strength of box girders in overhead travelling cranes / J. Zai, J. Cao, A.J. Bell // Journal of the Institution of Structural Engineers. – London: ISE, 1994. – Vol. 23-24 (72). – PP. 401–405.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Программа натурных испытаний эксплуатируемых подкрановых балок с трещинами

Программа составлена с учетом того, что на момент испытаний конструкции находятся в стадии эксплуатации, на подкрановые балки действует постоянная нагрузка в виде собственного веса конструкций и временная динамическая нагрузка от мостовых кранов. Основная грузоподъемность кранов, которые применяются на производстве, составляет от 125 до 500 тс. На время проведения подготовительных работ эксплуатация балок и работа кранов приостанавливается. Размещение тензометрической станции предполагается на ходовых мостках внутри подкрановых конструкций, уложенных на горизонтальную вспомогательную ферму.

В рамках испытаний рассматриваются две схемы загрузки, соответствующих действительным условиям эксплуатации конструкций:

- схема №1 – испытание участка подкрановой балки с трещиной при прохождении крана с пустой бадьей;
- схема №2 – испытание при прохождении бадьи с грузом, для фиксации максимальных внутренних усилий в элементах подкрановых балках.

В условиях эксперимента нагрузку на подкрановую балку от мостового крана предполагается учитывать только в вертикальном направлении без учета горизонтальной составляющей от возможного торможения тележки.

Для контроля положения крана и определения фактических мест приложения нагрузки используется видеозапись движения крана с тележкой. После испытаний производится соотнесение осциллограмм полученных величин напряжений и фактического положения крана по видеозаписи и определяется момент положения крана, при котором напряжения в элементах балки – максимальные (наиболее неблагоприятное положение кранов).

Согласно выявленному наиболее неблагоприятному положению кранов, по построенной расчетной схеме рассматриваемых подкрановых балок определяются

теоретические значения внутренних усилий и напряжений. Полученные значения впоследствии сопоставляются с данными натурных испытаний.

Определение напряженно-деформированного состояния испытуемых подкрановых балок выполняется при инструментальном наблюдении за следующими параметрами:

1. Относительные деформации наружных волокон стали поясов и стенок в соответствии со схемой расстановки тензорезисторов, приведенной на Рисунке П.2.1а.

2. Направления и величины главных деформаций волокон стали стенок (Рисунок П.2.1б).

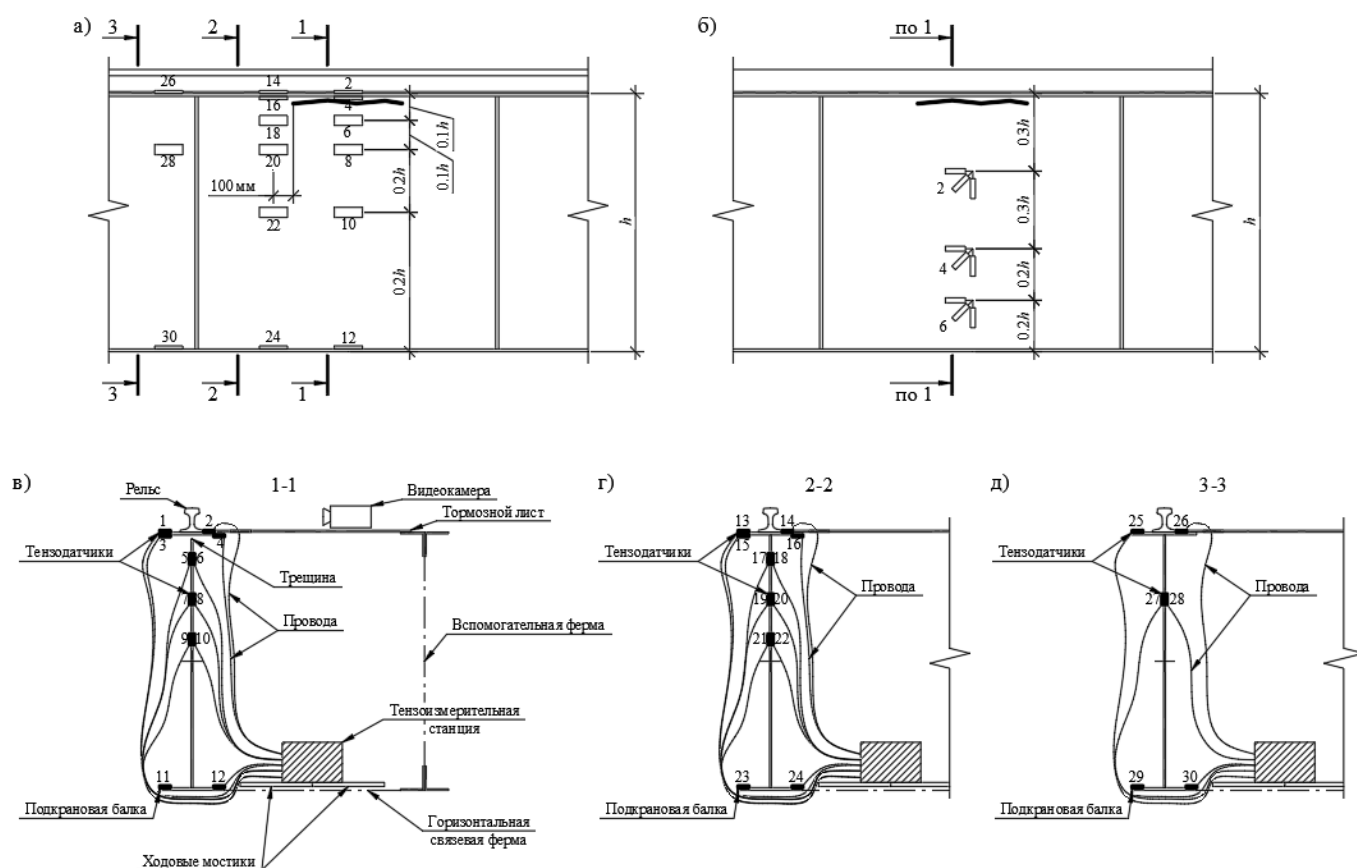


Рисунок П.2.1. Схема расстановки тензорезисторов: а) для определения нормальных напряжений; б) для определения касательных напряжений; в) сечение с трещиной; г) сечение без трещины (100 мм от края трещины); д) сечение в соседнем отсеке

За счет установки датчиков сверху и снизу сжатого пояса (Рисунок П.2.1а) в нем можно достаточно точно определить срединные (а не фибровые) напряжения. Установка прямоугольных тензорозеток в стенке с двух сторон (Рисунок П.2.1б)

аналогично позволяет определить срединные главные напряжения, зная которые, по известным зависимостям вычисляются действующие касательные напряжения.

При испытаниях поврежденных подкрановых балок выделяется три этапа: подготовительный этап, этап испытаний, камеральная обработка данных.

Подготовительный этап:

1. Проверка работы тензоизмерительной станции на контрольном образце. Составление программы ЭВМ для обработки результатов испытаний.
2. Проведение поверочных расчетов испытуемых подкрановых балок, вычисление теоретических внутренних усилий и напряжений в балках. Анализ результатов расчёта.
3. Поверочные обмеры испытуемых конструкций.
4. Визуальное освидетельствование испытуемых конструкций с целью выявления дефектов и повреждений.
5. Подготовка инструментальной базы (отладка, тарирование и калибровка приборов).

Этап испытаний:

1. Установка тензоизмерительной станции на ходовые мостки внутри подкрановых конструкций, уложенных на горизонтальную вспомогательную ферму и закрепление видеокамеры на тормозной лист.
2. Установка датчиков (Рисунок П.2.1): расчистка участков крепления тензорезисторов; приклеивание датчиков; припайка соединительных проводов и их крепление к тензоизмерительной станции. Количество датчиков на каждый испытываемый участок подкрановой балки (3 сечения): до 30 шт.
3. Пробное нагружение по схеме №1 для выявления чувствительности и работоспособности приборов.
4. Проверка измерительного оборудования. Корректировка и настройка приборов при необходимости.
5. Загружение конструкций по схеме №1. Снятие результатов испытаний.
6. Разгрузка конструкции.

7. Загружение конструкций по схеме №2. Снятие результатов испытаний.
Проверка корректности полученных результатов испытаний.

8. Разгрузка конструкции.

9. На всех этапах испытания производится фотофиксация основных элементов и состояний конструкций.

10. Аналогично п. 1 – 9 проведение испытаний других участков подкрановых балок с трещинами.

11. Заключение о целесообразности испытаний дополнительных участков и разработка дополнительной программы в случае выявления необходимости продолжения испытаний.

Камеральная обработка полученных данных:

По результатам проведенных работ оформляется отчет, где отображаются результаты определения несущей способности подкрановых балок в зависимости от параметров усталостных трещин в стенке, даются рекомендации по определению сроков временной эксплуатации поврежденных балок с учетом мероприятий по торможению их развития и по принятию типовых эффективных конструктивных решений в зависимости от выявленных особенностей напряженно-деформированного состояния и мест расположения усталостных трещин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Внедрение результатов диссертационной работы



Общество с ограниченной ответственностью
«Научно-исследовательский и проектный институт
«Эксплуатационный ресурс конструкций»
(ООО «НИПИ «ЭРКОН»)

Адрес: 191014, г. Санкт-Петербург,
ул. Маяковского, дом 17, Лит. А, пом. 8Н
Для писем: 191014, г. Санкт-Петербург, а/я 18
Тел./факс: (812) 272-13-94, 273-52-89
e-mail: office@erkon.ru, www.erkon.ru
ОГРН: 1187847168035; ИНН: 7841074885;
КПП: 784101001

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Кубасевича Антона Евгеньевича «Напряженно-деформированное и предельное состояние подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке».

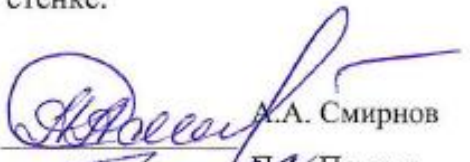
Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Кубасевича А. Е. «Напряженно-деформированное и предельное состояние подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке» рассмотрены в ООО «НИПИ «ЭРКОН» (ООО «Научно-исследовательский и проектный институт «Эксплуатационный ресурс конструкций»). Исследование напряженно-деформированного состояния подкрановых балок в диссертации осуществлялось на основе технической теории изгиба балок с учетом геометрических несовершенств конструкции, что позволило автору определить влияние трещины на несущую способность поврежденных балок.

Разработанная в диссертации инженерная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке позволяет значительно упростить проверку прочности таких балок, не используя для этого расчетные комплексы и сложные конечно-элементные модели. Результаты разработанной методики представлены в графической и табличной формах, которые используются в

практической работе нашей организации при оценке технического состояния подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

Исполнительный директор ООО «НИПИ «ЭРКОН»

Главный конструктор ООО «НИПИ «ЭРКОН», к. т. н.


А.А. Смирнов

Н.А. Пяткин

«24» июня 2022 г.

М.П.





МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)
 ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005



использования в учебном процессе материалов кандидатской диссертации
«НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫЕ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ
ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В
СТЕНКЕ» старшего преподавателя кафедры «Металлических и деревянных
 конструкций»
 Кубасевича Антона Евгеньевича

Материалы кандидатской диссертации старшего преподавателя кафедры «Металлических и деревянных конструкций» А. Е. Кубасевича используются в лекционном и практическом курсах по дисциплине «Металлические конструкции» при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство», специалистов по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», а также при выполнении магистерских диссертаций по направлению 08.04.01 «Строительство» на кафедре «Металлических и деревянных конструкций».

Заведующий кафедрой МДК
 д-р техн. наук, профессор

А. Г. Черных

«08» сентября 2022 г.