

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белый Григорий Иванович

Официальные оппоненты: **Притыкин Алексей Игоревич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Калининградский
государственный технический университет»,
кафедра судостроения, судоремонта и морской
техники, профессор;

Веселов Виталий Владиславович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», кафедра «Строительные
конструкции, здания и сооружения», доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет».**

Защита состоится «19» апреля 2023 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kubasevich-anton-evgenevich>.

Автореферат разослан «06» марта 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. М. Попов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы 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. Существенный вклад в исследование низкой долговечности и усталостной прочности подкрановых балок внесли 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., 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. Совершенствованию конструктивных форм и разработке долговечных подкрановых конструкций посвящены работы 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.

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.

Работа подкрановых балок с трещинами и оценка возможности их временной эксплуатации исследовалась Крыловым И.И., Васютой Б.Н., Железновым А.А., Склядневым 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.

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 работе 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 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.

В соответствии с поставленной целью в задачи исследования входило:

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.

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 положения теории устойчивости тонких пластин и теории изгиба балок, метод численного моделирования с применением конечно-элементного расчетного комплекса, труды отечественных исследователей работы подкрановых балок с усталостными трещинами.

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 материалами мониторинга подкрановых балок с трещинами, эксплуатируемых на действующем производстве, и данными натурных экспериментов.

Апробация результатов исследования.

Основные выводы и результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских 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 ведущих рецензируемых научных журналов, 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.

Во введении обоснована актуальность исследования напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке, определена степень разработанности проблемы, поставлены цели и задачи проводимых исследований, приведена научная

новизна, сформулированы теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе «Анализ исследований работы подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке» приведены общие сведения об эксплуатации подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке. Выполнен анализ исследований эксплуатационной пригодности поврежденных подкрановых балок. Показаны недостатки существующих методик оценки прочности подкрановых балок с трещинами, на основании которых сделан вывод об актуальности темы исследования.

Во второй главе «Устойчивость стенок подкрановых балок с трещинами в зоне сжатого пояса» 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. Предложена методика определения расчетных критических напряжений поврежденной стенки.

В третьей главе «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.

В четвертой главе «Сравнительный анализ теоретических исследований с данными натурных испытаний» проведен анализ результатов сопоставления полученных теоретических результатов с имеющимися материалами мониторинга и данными натурных испытаний, на основании которого сделан вывод о достоверности разработанного метода определения напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

В заключении изложены основные выводы и результаты диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. 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

Исследование влияния усталостных трещин в стенке на несущую способность подкрановых балок является весьма трудоемким мероприятием по следующим причинам:

- в поврежденной части балки, по мере роста трещины, существенно изменяется характер напряженно-деформированного состояния, который сопровождается изменением формы деформирования за пределами работающей стенки;
- необходимо учитывать весьма существенное влияние геометрических несовершенств стенок (см. рис. 1), наихудшие формы которых должны определяться из решения соответствующих бифуркационных задач устойчивости, а также несовершенств сжатых поясов.

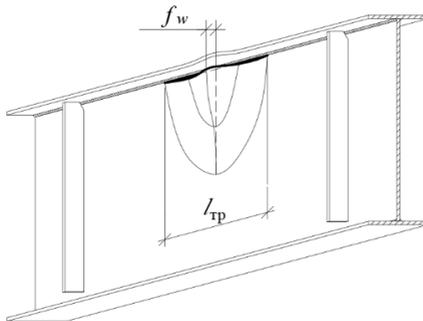


Рис. 1. Геометрические несовершенства подкрановой балки с трещиной в стенке

Учитывая изложенное, для исследования напряженно-деформированных состояний и критических параметров устойчивости стенок поврежденных подкрановых балок применяется метод численного моделирования с использованием конечно-элементного программного комплекса ANSYS.

При моделировании работы материала в ANSYS была принята упрощенная билинейная диаграмма работы стали (см. рис. 2), расчет проводился в упругой стадии, материал балок был установлен из строительной стали повышенной прочности класса С345 ($R_{yn} = 325$ МПа), который обобщался на другие марки стали. Расчетные модели создавались из конечных элементов оболочечного типа (тип – SHELL281).

Выбор геометрических параметров сечений балок для численных исследований определялся с учетом анализа параметров типовых сварных подкрановых балок по Серии 1.426.2-7. Выпуск 3. При этом гибкости стенок

принимались трех типов $\lambda_w = \{100; 120; 140\}$, с соответствующими им условными гибкостями $\bar{\lambda}_w = \{3,94; 4,73; 5,52\}$, которые охватывают широкий спектр запроектированных балок и имеют геометрические характеристики, близкие к реальным подкрановым балкам. Трещина моделировалась как «разрыв» между стенкой и сжатым поясом, позволяющий свободно перемещаться верхней грани стенки относительно сжатого пояса, основным геометрическим параметром которой являлась относительная длина:

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

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

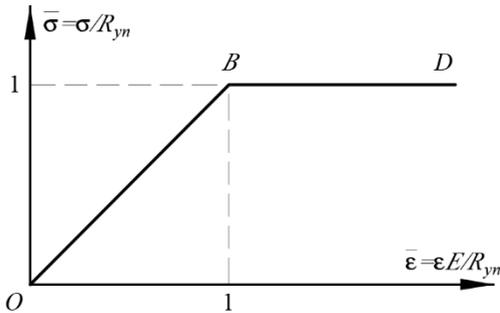


Рис. 2. Обобщенная расчетная диаграмма работы стали

Распространение трещины в численных исследованиях рассматривалось в пределах одного отсека, положения трещины принимались посередине отсека и у ребра жесткости. Нагрузка прикладывалась по краям фрагмента балки, состоящего из трех отсеков, средний из которых имел усталостную трещину, что позволило проследить изменение картины напряженно-деформированного состояния в поврежденном фрагменте балки. Общий вид расчетной модели с приложенной нагрузкой в виде изгибающего момента и поперечной силы показан на рис. 3.

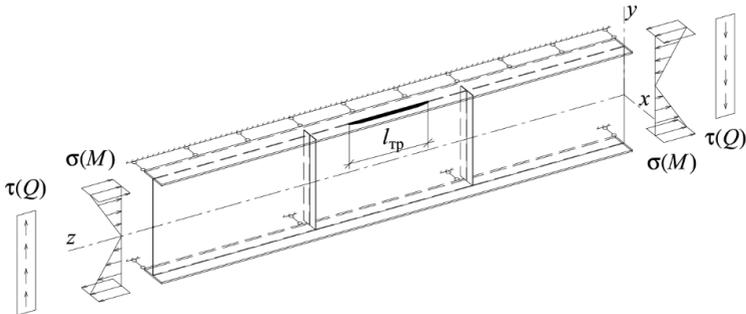


Рис. 3. Общий вид расчетной модели подкрановой балки с граничными условиями и нагрузкой

Алгоритм решения поставленной задачи разделяется на два этапа:

Этап I. Определение форм начальных геометрических несовершенств поврежденной подкрановой балки

Известно, что в процессе изготовления и монтажа стальных конструкций имеют место несовершенства, которые учитываются в расчетах подкрановых балок по предельным состояниям. В процессе эксплуатации с появлением и развитием трещин эти несовершенства получают соответствующее развитие, которое необходимо учитывать при проверке несущей способности подкрановых балок с трещинами.

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 погиби со стороны крана.

Этап II. Решение деформационной задачи поврежденного фрагмента балки

Введение изначальных геометрических несовершенств осуществлялось при помощи команд программирования APDL из файла результатов расчета, полученного по завершении этапа I. После чего решалась соответствующая деформационная задача по схеме загрузки, показанной на рис. 3.

Общий алгоритм определения напряженно-деформированных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке с учетом геометрических несовершенств показан на блок-схеме рис. 4.



Рис. 4. Алгоритм определения напряженно-деформированных состояний поврежденных подкрановых балок с учетом геометрических несовершенств

2. Результаты исследования устойчивости поврежденной стенки подкрановой балки при раздельном и совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Задача устойчивости стенки с усталостной трещиной решалась с учетом геометрических несовершенств в виде ее местных выпучиваний (см. рис. 5), которые масштабировались в зависимости от высоты h_w . Максимальное отклонение стенки было принято в соответствии с техническими условиями на стальные конструкции и составило $f_{0w} = 0,003h_w$.

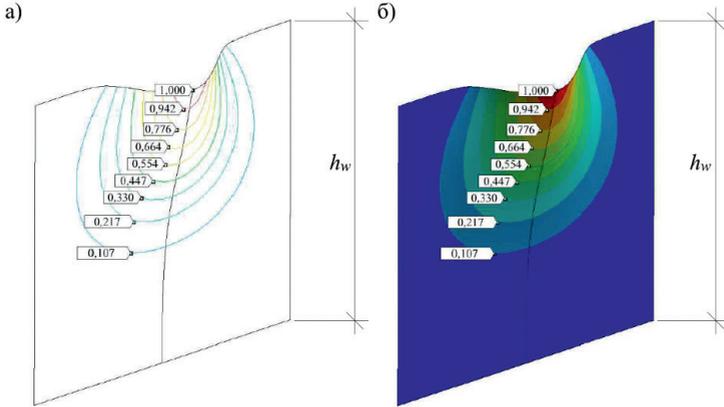


Рис. 5. Формы потери местной устойчивости стенки: а) в изополях; б) в изолиниях

По отечественным нормам проектирования расчетным критическим напряжениям неповрежденной стенки соответствуют такие значения, при которых в балке наступает предельное состояние. При появлении и развитие трещины критические напряжения стенки снижаются, сжатая часть становится менее нагруженной. При этом центр тяжести сечения смещается в сторону растянутого пояса, чему сопутствует увеличение напряжений в сжатом поясе, который удерживается рельсом и тормозной конструкцией. Определение расчетных критических напряжений стенки с трещиной осуществлялось при проектном положении сжатого пояса с учетом перераспределения усилий (см. рис. 6) по достижении предельного состояния в сечении балки.

Решение задачи устойчивости стенки производилось при различном положении и длине трещины в отсеке с раздельным действием изгибающего момента и поперечной силы. Зависимости расчетных критических параметров устойчивости стенки с трещиной показаны на графиках рис. 7-8. Для удобства совместной оценки, напряжения приведены в относительных параметрах:

$$\bar{\sigma}_{cr,ef}^{TP} = \sigma_{cr,ef}^{TP} / \sigma_{cr,ef}; \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_{cr,ef}^{TP} = \tau_{cr,ef}^{TP} / \tau_{cr,ef}, \quad (3)$$

где $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$ – расчетные критические напряжения стенки без трещины со средней условной гибкостью $\lambda_{w,TP} = 4,73$.

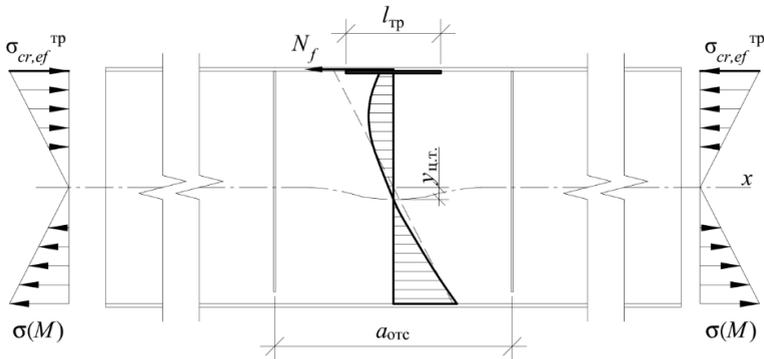


Рис. 6. Схема загрузки балки при определении критических нормальных напряжений в стенке с учетом перераспределения усилий

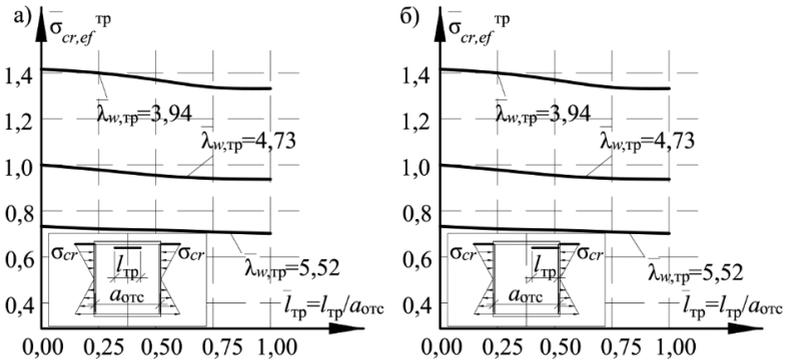


Рис. 7. Зависимости закритических напряжений стенки при чистом изгибе с трещиной: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости

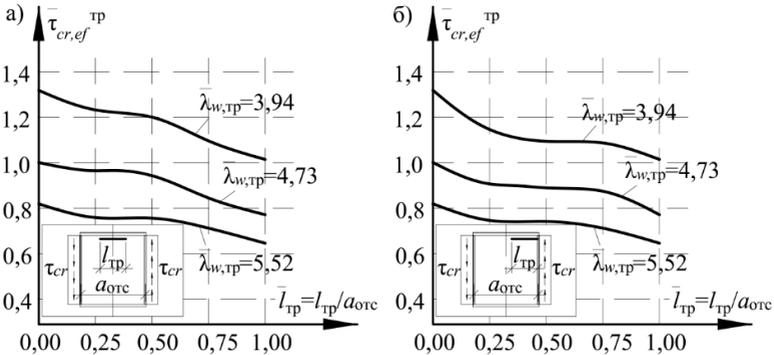


Рис. 8. Зависимости закритических напряжений стенки при чистом сдвиге с трещиной: а) посередине отсека; б) у ребра жесткости

Численные значения относительных параметров напряжений также приведены в таблицах 1-2, в них $\sigma_{cr,ef}$ и $\tau_{cr,ef}$ – расчетные критические напряжения стенок без трещин соответствующих гибкостей. В числителе приведены относительные напряжения при положении трещины посередине отсека, в знаменателе – у ребра жесткости.

Таблица 1. Зависимости снижения относительных критических 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. Зависимости снижения относительных критических 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

Аналогичным образом исследовалось влияние трещины на устойчивость стенки при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы. Было показано, 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.

3. Результаты исследования влияния трещин на изменение напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с учетом геометрических несовершенств стенки и сжатого пояса

Несущая способность сжатого пояса при действии изгибающего момента

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-деформированные состояния поврежденных отсеков изменяется. Характерная эпюра действующих нормальных напряжений, соответствующих сечению в середине трещины (см. рис. 9а), показана на рис. 9б, где x_0 – горизонтальная ось центра тяжести сечения без трещины, $y_{ц.г.}$ – величина смещения центра тяжести. По мере увеличения длины трещины происходит изменение воспринимаемых усилий в поврежденном сечении: усилия в поясах возрастают, чему сопутствует уменьшение изгибающего момента, воспринимаемого стенкой (см. рис. 9в).

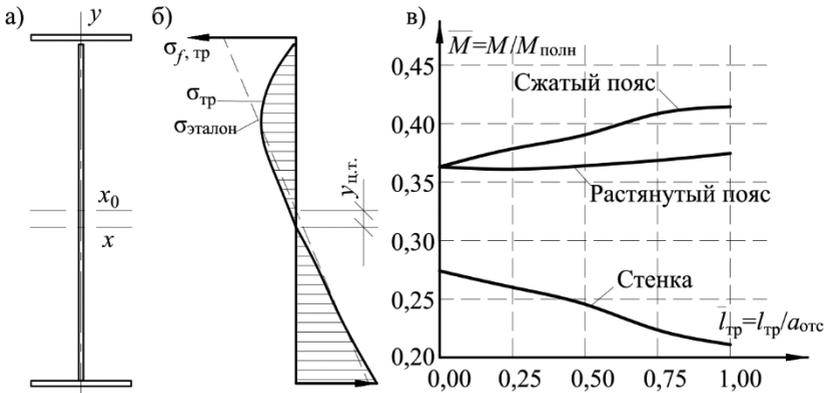


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние балки при изгибе:
а) сечение с трещиной; б) эпюра нормальных напряжений; в) зависимости увеличения воспринимаемых усилий в элементах от длины трещины

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 оценивалось влияние трещин на увеличение напряжений в сжатом поясе из предположения его полной работы при действии изгибающего момента с учетом несовершенств в виде местных выпучиваний стенки. В таблице 3 показано возрастание относительных нормальных напряжений в сжатом поясе $\bar{\sigma}_{f,тр} = \sigma_{f,тр} / \sigma_f$ в зависимости от условной гибкости стенки и длины трещины. Относительные напряжения при положении трещины посередине отсека приведены в числителе, в знаменателе – у ребра жесткости.

Таблица 3. 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

На втором этапе определялось влияние несовершенства крепления рельса и геометрических несовершенств сжатого пояса на увеличение в нем усилий. Как показал опыт эксплуатации стальных конструкций, указанные несовершенства имеют следующие величины отклонений:

- при местной погиби сжатого пояса (см. рис. 10а) его отклонения по вертикали $w_{j0} = 0,02b_j$;
- отрыв сжатого пояса от стенки на $\Delta_{wf} = 1,5$ мм / 1 п. м, чему также сопутствует его местная погибь (см. рис. 10б). Эти несовершенства принимались в сочетании с возможным отклонением рельса по вертикали, вызывающим дополнительную деформацию пояса в зоне трещины.

По результатам исследований было выявлено, что принятые несовершенства пояса, положение трещины и гибкость стенки незначительно влияют на возрастание напряжений в поясе. Полученные результаты сведены в одну таблицу 4 в зависимости от длины трещины.

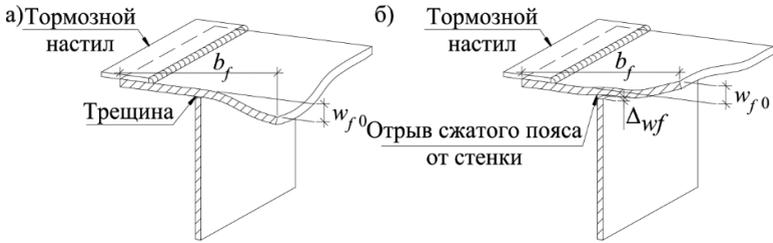


Рис. 10. Начальные геометрические несовершенства сжатого пояса:
а) местная погибь со стороны крана; б) отрыв от стенки в зоне трещины

Таблица 4. Зависимости 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

Несущая способность стенки при действии поперечной силы

В сварных балках двутаврового сечения с трещинами стенки продолжают воспринимать поперечную силу, влияние трещины на изменение их напряженно-деформированных состояний определялось с учетом несовершенств в виде местных выпучиваний. Характерная эпюра действующих касательных напряжений в сечении, соответствующем середине трещины показана на рис. 11.

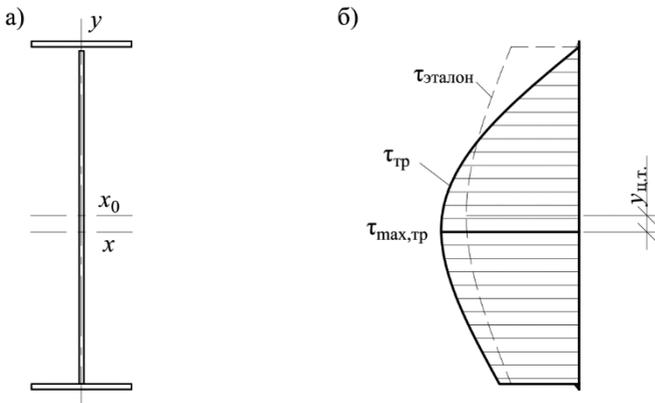


Рис. 11. Касательные напряжения в балке с трещиной в стенке:
а) сечение с трещиной; б) эпюра напряжений

Результаты исследований по определению влияния трещины на увеличения максимальных касательных напряжений в стенке в зависимости от ее гибкости, длины и положения трещины в отсеке сведены в таблицу 5, в которой $\bar{\tau}_{\max, \text{тр}} = \tau_{\max, \text{тр}} / \tau_{\max}$.

Таблица 5. 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 $\bar{\lambda}_{\text{в, тр}}$, 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

Аналогичным образом исследовалось изменение напряженно-деформированных состояний подкрановых балок с трещинами при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы. Было выявлено дополнительное увеличение нормальных напряжений в сжатом поясе до +4,4%, максимальных касательных в стенке до +3,0%, что также необходимо учитывать при оценке напряженно-деформированных состояний поврежденных балок.

4. 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:

$$\frac{M_x}{c_{f, \text{тр}} I_x R_y \gamma_c} y \pm \frac{M_y}{I_y R_y \gamma_c} x \leq 1; \quad (4)$$

$$\frac{QS}{c_{\text{в, тр}} I_x I_w R_s \gamma_c} \leq 1; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{c_{1, \text{тр}} \sigma_{\text{cr, ef}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{c_{2, \text{тр}} \tau_{\text{cr, ef}}} \right)^2} \leq 1, \quad (6)$$

где $c_{f,тр}$, $c_{w,тр}$ – коэффициенты, учитывающие влияние трещины на перераспределение напряжений в балке; $c_{1,тр}$ и $c_{2,тр}$ – коэффициенты влияния трещины на устойчивость стенки, зависящие от относительной длины трещины $\bar{l}_{тр}$ ее положения в отсеке и гибкости стенки $\bar{\lambda}_{w,тр}$, и приведенные в таблицах 6-8. Во формулах (4)-(6) геометрические параметры сечений вычисляются как для неповрежденных балок.

Таблица 6. 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 7. 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

Таблица 8. 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

На основании разработанной инженерной методики оценки прочности поврежденной подкрановой балки предлагается алгоритм определения предельной длины трещины $[\bar{l}_{тр}]$, приведенный на рис. 12.



Рис. 12. Алгоритм определения предельной длины трещины

С применением графических зависимостей длины трещины от времени эксплуатации можно произвести оценку остаточного ресурса поврежденных балок. 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 $T_{\text{ост}}$ (см. рис. 13).

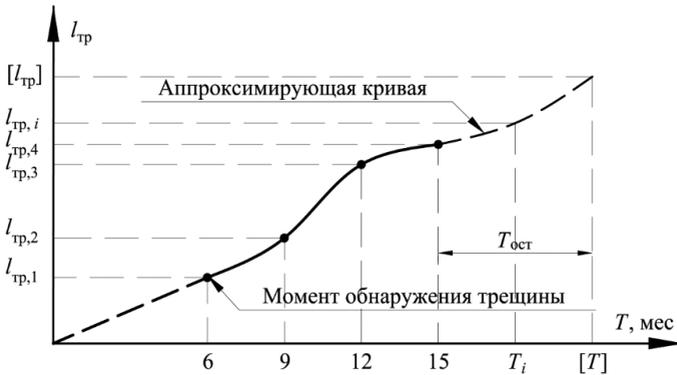


Рис. 13. Определение временного ресурса эксплуатации подкрановой балки с трещиной

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 ($K_{\text{исп, max}}$), ее предельная длина $[l_{\text{тр}}]$, и остаточный временной ресурс $T_{\text{ост}}$.

5. Сравнение результатов исследований по разработанному методу с материалами мониторинга подкрановых балок с трещинами, эксплуатируемых на действующем производстве, и данными натуральных экспериментов

Для подтверждения достоверности полученных теоретических результатов производилось сравнение последних с данными натуральных испытаний и имеющимися материалами продолжительного мониторинга подкрановых балок с трещинами.

Первое сравнение – с данными натуральных испытаний эксплуатируемых подкрановых балок с усталостными трещинами здания главного корпуса сталеплавильного производства (конвертерного цеха) ПАО «Северсталь», выполненных ООО «НИПИ «ЭРКОН». Всего было испытано две подкрановые балки с трещинами в стенке значительной протяженности при нагрузке, соответствующей реальным условиям эксплуатации. По результатам испытаний были определены нормальные напряжения, действующие в сечениях поврежденной балки.

Сравнение показало, что разработанная методика расчета подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке хорошо согласуется с данными натуральных экспериментов, величины полученных напряжений близки, расхождения не превышают 5,6%. При этом во всех случаях теоретические напряжения больше экспериментальных, что показывает небольшие запасы, заложенные в предлагаемой методике.

Второе сравнение – с материалами продолжительного мониторинга эксплуатируемых балок с трещинами, также проведенного ООО «НИПИ «ЭРКОН». Для сравнительного анализа теоретических результатов с данными мониторинга было выделено 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.

Анализ материалов мониторинга подкрановых 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.

Третье сравнение – с результатами натуральных испытаний моделей подкрановых балок с трещинами Железнова А. А. В сравнение включались только те эксперименты, в которых исследовалось изменение напряженно-деформированных состояний поврежденных балок и были приведены все необходимые данные для теоретического расчета, всего были включены результаты испытаний 10 марок балок.

Сравнение нормальных напряжений в сжатом поясе и максимальных касательных напряжений в стенке, полученных по результатам эксперимента и вычисленных по разработанной методике расчета прочности, также продемонстрировало ее достоверность. Разница теоретических и экспериментальных напряжений в среднем не превысила 3%, в 100% случаев теоретические напряжения больше экспериментальных.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработаны численная модель и метод расчета подкрановых балок с горизонтальными усталостными трещинами в стенке, позволяющие определить их напряженно-деформированные состояния и предельные состояния. 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, 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 имеющимися материалами продолжительного мониторинга и данными натурных испытаний показали достоверность разработанного метода определения напряженно-деформированных и предельных состояний подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии:

1. **Кубасевич, А.Е.** Устойчивость стенок подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 47–53. (0,88 п.л.)
2. **Кубасевич, А.Е.** Работа подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 64–70. (0,88 п.л.)
3. Белый, Г.И., **Кубасевич А.Е.** Несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 24–29. (0,75 п.л.)
4. Белый, Г.И., **Кубасевич А.Е.** Влияние геометрических несовершенств сжатого пояса на несущую способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 14–29. (0,88 п.л.)

Публикации в других изданиях:

5. **Кубасевич А.Е.,** Тонаканян М.М. Влияние технологических факторов негеометрического характера на появление и развитие усталостных трещин в зоне сжатого пояса подкрановых балок // Технология и организация строительного производства. Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2021. С. 252–257. (0,70 п.л.)

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 16.02.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 20.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.