

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

На правах рукописи

МАТВЕЕВ Егор Андреевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ С ДЕФЕКТАМИ И ПОВРЕЖДЕНИЯМИ**

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 – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Типы наиболее распространенных дефектов и повреждений элементов стальных конструкций	10
1.2 Краткий обзор исследований прочности элементов стальных конструкций ..	13
1.3 Краткий обзор исследований устойчивости стержней сплошного сечения	18
1.4 Выводы по главе	26
ГЛАВА 2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫЕ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СЕЧЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЛОКАЛЬНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ	28
2.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения	28
2.2 Переход от локальных повреждений к эквивалентному ослаблению в виде выреза	30
2.3 Обратный метод решения задач прочности стержневых элементов, имеющих локальные повреждения	32
2.4 Алгоритм решения обратной задачи прочности стальных элементов, имеющих повреждения	37
2.5 Влияние локальных повреждений на прочность стальных конструкций	38
2.6 Сравнение полученных результатов расчета на прочность по предлагаемому алгоритму с результатами расчетов по методу конечных элементов	41
2.7 Сравнение результатов расчета на прочность неповрежденных элементов стальных конструкций по предлагаемому методу и СП	45
2.8 Практический метод расчета на прочность стержневых элементов стальных конструкций с повреждениями	48
2.8.1 Определение фиктивной силы, компенсирующей несимметричное ослабление пояса	49
2.8.2 Определение фиктивных сил, компенсирующих ослабления стенки и полки	49
2.8.3 Расчет на прочность поврежденных элементов при общем нагружении	51
2.8.4 Расчет на прочность элементов с несимметричным повреждением при упругопластической работе материала	51

2.8.5	Расчета на прочность элементов с симметричным повреждением при упругопластической работе материала	52
2.9	Выводы по главе.....	53
ГЛАВА 3.	УСТОЙЧИВОСТЬ СТРЕЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	
	КОНСТРУКЦИЙ, ИМЕЮЩИХ ПОВРЕЖДЕНИЯ И ОБЩИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ	
	ОСИ	54
3.1	Постановка задачи, гипотезы и допущения	54
3.2	Расчетная схема поврежденного элемента	55
3.3	Аналитический метод деформационного расчета упругого стержня с дополнительным действием фиктивных сил	56
3.4	Обратный численно-аналитический метод расчета упругопластического поврежденного элемента.....	61
3.4.1	Определение концевых эксцентриситетов продольной силы при общем коррозионном повреждении.....	64
3.4.2	Определение концевых эксцентриситетов при локальном повреждении.....	65
3.4.3	Определение коэффициентов потери устойчивости	65
3.5	Влияние общего коррозионного повреждения на устойчивость по изгибной форме.....	66
3.6	Влияние симметричного локального повреждения на устойчивость по изгибной форме.....	68
3.7	Влияние общего коррозионного повреждения на устойчивость по изгибно-крутильной форме.....	70
3.8	Влияние локального повреждения на устойчивость по изгибно-крутильной форме.....	72
3.9	Влияние начального искривления оси элемента в двух главных плоскостях на устойчивость по изгибно-крутильной форме	74
3.10	Определение коэффициента потери устойчивости методом конечных элементов	78
3.11	Сравнительный анализ методов расчета на устойчивость внецентренно сжатых поврежденных элементов, изгибаемых в плоскости большей жесткости	80
3.12	Сравнительный анализ методов расчета на устойчивость внецентренно сжатых поврежденных элементов, изгибаемых в двух главных плоскостях	80
3.13	Практический метод расчета на устойчивость стержневых элементов стальных конструкций, имеющих дефекты и повреждения	83
3.14	Выводы по главе.....	84

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЛОКАЛЬНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ВИДЕ ВЫРЕЗА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУТАВРОВОГО ЭЛЕМЕНТА	85
4.1Цель и задачи исследования	85
4.2Опытные образцы	86
4.3Механические характеристики стали экспериментальных образцов	91
4.4Экспериментальная установка	92
4.5Измерительная аппаратура и оборудование.....	93
4.6Методика проведения экспериментального исследования.....	96
4.7Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических исследований	98
4.8Вывод по главе	107
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
Приложение 1. Диаграммы растяжения сталей.....	121
Приложение 2. Акт внедрения.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Техническое перевооружение и реконструкция действующих предприятий, широко проводимые в настоящее время, основаны на оценке технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений. Стальные конструкции, как известно, являются достаточно чувствительными к дефектам и повреждениям, приобретённым в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации, которые в сочетании с возможной коррозией металла значительно ускоряют физический износ, приводя их к ограниченно-работоспособному состоянию или к эксплуатационной непригодности. Анализ результатов обследования [63, 69, 73, 106] показал, что до 20 % металлических конструкций имеют искривления оси элемента, коррозионные повреждения, местные погиби и вырезы частей сечения.

В методах расчета существующих нормативных документов [95] не учитывается влияние дефектов и повреждений на несущую способность элементов стальных конструкций, а имеющиеся рекомендации в пособии [81] по проектированию их усилия в большей степени относятся к элементам эксплуатируемых стальных конструкций покрытий из спаренных уголков. Указанные рекомендации не могут быть распространены на другие типы поперечных сечений и в значительной степени не охватывают весь комплекс факторов, которые могут оказать существенное влияние на несущую способность элементов и конструкций в целом.

Достоверная оценка прочности и общей устойчивости эксплуатируемых стальных конструкций может быть получена на основе разработанного быстросействующего расчётного аппарата, который дал бы возможность достаточно обосновано выявлять фрагменты конструкций и (или) их элементов, нуждающихся в немедленном усилении, и элементы с потенциально опасными дефектами и повреждениями. Учитывая изложенное, тема диссертации является *актуальной*.

Целью исследования является исследование особенностей влияния наиболее распространённых дефектов и повреждений на несущую способность сплошностенчатых стержневых элементов стальных конструкций и разработка метода их расчета.

В рамках исследования были определены следующие задачи:

1. Адаптировать «обратные» численный и численно-аналитический методы на расчет несущей способности сплошностенчатых элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями и изучить особенности влияния их параметров и места расположения на прочность и общую устойчивость.

2. С целью унификации решения свести параметры механических и коррозионных повреждений, вызывающих потерю местной устойчивости, к эквивалентному ослаблению сечения в виде выреза.

3. Выявить зависимости несущей способности стальных элементов от величины и места расположения повреждения, величины и направления начального искривления оси относительно параметров загрузки.

4. Выполнить экспериментальное исследование влияния обобщенного локального повреждения в виде выреза на устойчивость двутаврового элемента.

5. Разработать гармонизированный с действующими нормами проектирования практический метод расчета элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями на прочность и общую устойчивость.

Научная гипотеза исследования состоит в том, что развитие и распространение «обратных» численного и численно-аналитического методов применительно к расчету стальных сплошностенчатых стержневых элементов с дефектами и повреждениями, вызывающими при любом виде загрузки возникновение в сечении дополнительных усилий, позволит выявить и охарактеризовать зависимости влияния параметров дефектов и повреждений на прочность и общую устойчивость.

Объект исследования – сплошностенчатый стержневой элемент стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

Предмет исследования – параметры прочности и устойчивости элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

Научная новизна исследований.

1. Доказана применимость и выполнена адаптация «обратных» численного и численно-аналитического методов расчёта прочности и общей устойчивости применительно к элементам стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

2. Установлены зависимости снижения несущей способности стальных элементов от величины и места расположения повреждения, величины и направления начального искривления оси относительно параметров загрузки.

3. Выявлена закономерность снижения общей устойчивости от степени общего коррозионного повреждения, с учетом потери местной устойчивости утоненных элементов сечения.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные автором методы расчета элементов стальных конструкций, дают возможность с достаточной степенью точности установить зависимости прочности и устойчивости от параметров и места расположения дефектов и повреждений, что позволяет более обосновано оценивать техническое состояние эксплуатируемых стальных конструкций.

Практическая значимость работы заключается в возможном применении предложенного метода расчета на прочность и общую устойчивость эксплуатируемых элементов стальных конструкций, в котором влияние повреждений компенсируется дополнительным догрузением фиктивными силами.

Методология и методы исследования. Методологическую основу диссертационного исследования составляют положения деформационной теории расчета упругих стержней, «обратные» численный и численно-аналитический методы, а также апробированный алгоритм «сечение», отличительной

особенностью которого является учет физической нелинейности материала и ослаблений, и метод упругих решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Адаптированные «обратные» численный и численно-аналитический методы на расчет прочности и общей устойчивости элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и (или) повреждениями, влияние которых при любом нагружении стимулирует возникновение в сечении дополнительных усилий.

2. Зависимости снижения несущей способности стальных элементов от величины и места расположения повреждения, величины и направления начального искривления оси относительно параметров нагружения.

3. Результаты экспериментального исследования влияния обобщенного локального повреждения в виде выреза на устойчивость двутаврового элемента.

4. Практический метод расчета на прочность и общую устойчивость элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями, гармонизированный с действующими нормами проектирования.

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

Достоверность результатов обоснована применением общепринятых расчетных допущений, включающих теорию деформационного расчета упругих стержней и стандартные модели поведения упругопластических материалов; обеспечена хорошим согласованием результатов расчета на основе разработанных методов с результатами известных решений частных задач, а также хорошей сходимостью теоретических выводов с экспериментальными результатами, полученными при выполнении диссертационной работы.

Апробация результатов. Основные выводы и результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях и конкурсах:

1. LXXXVI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.).

2. 81-ой Всероссийская научно-техническая конференция «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии» (г. Самара, 2024 г.).

3. XII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (г. Москва, 2024 г.).

4. LXXVII Национальная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

5. LXXIX Международная научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы используются ООО «Научно-исследовательский и проектный институт «Эксплуатационный ресурс конструкций» (ООО «НИПИ «ЭРКОН») (г. Санкт-Петербург) при проведении реконструкции и техническом перевооружении действующих предприятий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – 122 страницы машинописного текста, включая 8 таблиц, 52 рисунка и 61 формула. Список литературы содержит 133 наименований, в том числе 24 – на иностранных языках.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Типы наиболее распространенных дефектов и повреждений элементов стальных конструкций

Обеспечение надежности, безопасности и долговечности зданий и сооружений неразрывно связано с необходимостью своевременной оценки технического состояния их несущих элементов. Элементы металлических конструкций в силу тонкостенности являются достаточно чувствительными ко всякому рода дефектам и повреждениям, которые могут накапливаться в них в процессе изготовления, транспортирования, хранения, монтажа и эксплуатации. Указанные несовершенства, как показали ряд исследований [30, 69, 73, 108], оказывают существенное влияние на несущую способность, что в конечном счете может привести к эксплуатационной непригодности, а в некоторых случаях к аварии [49, 62, 90, 102, 107].

В практике обследования стальных конструкций, все дефекты и повреждения можно разделить на глобальные и локальные. Первые из них могут существенно изменять характер работы конструкции в целом, а вторые, оказывают влияние на несущую способность одного или нескольких элементов.

Согласно [109] к наиболее распространённым глобальным дефектам и повреждениями стальных элементов можно отнести:

- неравномерные осадки оснований, происходящие по разным причинам;
- расстройство и расцентровка основных узлов сопряжения;
- коррозия металла общего характера (см. Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 Коррозия металла общего характера

На основании данных, представленных в работах [30, 108], среди локальных дефектов и повреждений наиболее распространёнными являются:

- механические повреждения полок и стенок (погнутости, вырезы, вырывы, истирания) (см. Рисунок 1.2а);
- локальная коррозия, приводящая к потере местной устойчивости (см. Рисунок 1.2б);
- пространственное искривление оси элемента (см. Рисунок 1.2в);
- некачественное выполнение сварных швов

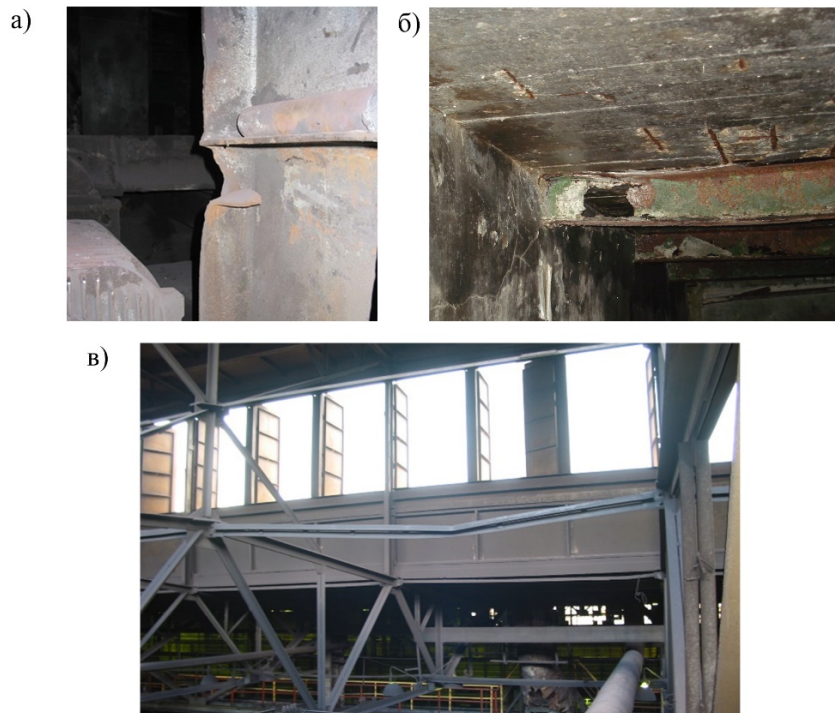


Рисунок 1.2 Характерные локальные повреждения а) – вырез полки двутавра; б) – коррозия; в) искривление оси элемента

Результаты обследований эксплуатируемых металлических дымовых и вентиляционных труб, а также несущих металлических башен, проведённых специалистами ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, научно-производственного консорциума «НПК Изотермик» и института «Харьковский Промстройниипроект» [109], свидетельствуют о том, что наиболее распространёнными дефектами и повреждениями являются местные погиби элементов решетки и коррозионный износ элементов башни, превышающий 10% сечения.

В результате обследования объекта культурного наследия «Водонапорная башня», расположенного на территории Выксунского металлургического завода были обнаружены характерные дефекты и повреждения в виде искривлений оси, местных погибей элементов и сплошной коррозии металла.

При обследовании несущих металлических конструкций павильона №34 «Космос» были обнаружены дефекты и повреждения элементов купола [30]. Они представлены в виде местных искривлений полок уголков, вырезов в полках кольцевых прогонов и коррозионного износа элементов металлических конструкций купола.

В ряде исследований [49, 62, 90, 107] было показано, что такие подобные накопленные несовершенства, усугубляемые развитием коррозионных повреждений, существенно ускоряют износ конструкций, приводя к снижению несущей способности и переводу их в категорию ограниченно работоспособных, а в отдельных случаях – к полной потере эксплуатационной пригодности.

Для оперативного принятия решений в этих случаях необходимо иметь такой быстродействующий метод расчета, который позволил бы обосновано и достоверно выявлять фрагменты конструкций и (или) их элементы, нуждающиеся в немедленном усилении, и элементы с потенциально неопасными дефектами и повреждениями.

1.2 Краткий обзор исследований прочности элементов стальных конструкций

При проведении обследования и выполнении поверочных расчетов строительных конструкций с целью определения технического состояния и эксплуатационной пригодности, большое внимание уделяется прочности отдельных стержневых элементов с дефектами и повреждениями.

Исследованию вопросов прочности были посвящены работы Н.С. Стрелецкого [97, 98], С.П. Тимошенко [99], А.Р. Ржаницына [86], Г.Е. Бельского [23, 25], А.А. Потапкина [82, 83], Н.Л. Чернова [103], Б.И. Любонова [67], М.В. Асташкина [1] и Г.И. Белого [17, 19].

С.П. Тимошенко [99], проанализировал существующие теории прочности начала XX века и для получения более полной картины прочности материалов исследуемых элементов предлагал использовать поверхность предельно допустимого силового взаимодействия, то есть поверхность в каждой точке, характеризующую прочность материалов сечения стержневого элемента при заданном соотношении внешних сил.

В работе [86] А.Р. Ржаницын исследовал прочность стержневых элементов прямоугольного поперечного сечения, используя графический метод, разработанный С.П. Тимошенко. Посредством аналитических вычислений были получены предельные значения изгибающих моментов и продольных сил, при которых в поперечном сечении формируется пластический шарнир. Кривые взаимодействия соответствующих предельных усилий аппроксимированы параболическими зависимостями.

Е.И. Беленя в работе [5] при оценке несущей способности стержней двухсимметричных поперечных сечений, предельное состояние которых определяется образованием пластического шарнира, применял графический подход, известный как линия перехода в пластическую стадию. В частности, для стержня прямоугольного сечения указанная линия имеет форму окружности.

В исследованиях [97, 98] Н.С. Стрелецкого одной из главных величин, определяющих предельное состояние, названа предельная деформация. Так как прекращение эксплуатации происходит в доаварийном состоянии конструкции, то поэтому пределом эксплуатационной способности является деформация, препятствующая процессу эксплуатации. Из этого следует, что предельные деформации представляют собой определяющий показатель при оценке несущей способности конструкции. Условие прочности сечения считается выполненным, если вычисленное значение деформации не превышает нормативно установленного предельного значения.

Развитие подходов к формированию деформационных критериев оценки прочности элементов стальных конструкций по признаку полной непригодности к эксплуатации нашло отражение в работах Г.Е. Бельского [24, 25], Б.И. Любарова [67, 68] и ряда других авторов.

В работах [23, 24] Бельский Г.Е. обращал внимание на то, что поверхности взаимодействия, формируемые на основе диаграммы Прандтля, отражают лишь напряжённо-деформированное состояние сечения при неустановленных значениях деформаций, но не раскрывают его фактическую несущую способность. Это обстоятельство побудило автора разработать критерии, ограничивающий предельные деформации применительно к различным формам поперечных сечений. В исследовании [23] установлено, что в условиях сложного нагружения расчётная несущая способность, определённая по критерию образования пластического шарнира, оказывается на 2–5% выше значения, полученного при использовании критерия предельных пластических деформаций.

Г.Е. Бельский в работе [24] аргументирует обоснованность перехода к оценке предельных состояний с опорой на критерий остаточных деформаций. Ключевое отличие данного подхода от традиционного заключается в том, что непосредственная проверка предельного состояния заменяется анализом величины деформаций, оставшихся в конструкции после полного снятия нагрузки. В качестве

расчётных параметров автор принимает остаточную деформацию $\bar{\varepsilon}_{ост} = 3 (\bar{\varepsilon} = \varepsilon E / R_y)$ при соответствующей величине полной деформации $\bar{\varepsilon}_{max} = 4$.

В исследованиях [82, 83] А.А. Потапкин обобщил метод расчета, основанный на ограничении пластических деформаций, на стальные элементы мостовых сооружений. В качестве допустимого диапазона пластической составляющей деформации в сечениях стальных конструкций автор принимает значения $\varepsilon = 0,006 - 0,0025$. Проведённые исследования подтвердили, что ограничение указанной величины значением $\varepsilon = 0,006 - 0,0025$ не приводит к снижению работоспособности мостовых конструкций ни по одному из рассматриваемых показателей.

Согласно исследованиям Н.Л. Чернова [103], Н.Н. Стрелецкого [85] и Б.И. Любарова [67], расчёт прочности с нормированием пластических деформаций выступает надёжным инструментом защиты стальных конструкций. Такой подход помогает предотвратить ряд проблем в процессе эксплуатации — например, чрезмерные полные и остаточные перемещения, а также ухудшение ключевых свойств материала: ударной вязкости, хрупкой прочности, выносливости и общих механических характеристик стали.

Для оценки напряжённо-деформированного состояния поперечного сечения необходимо определить значения напряжений и относительных деформаций. При выполнении расчётов принимают во внимание следующее:

1. точность модели деформирования (используют приближённый или точный подход);
2. особенности диаграммы работы стали;
3. выполнение условий равновесия системы.

Данная задача решается итерационным методом. Расчет сечения на прочность целесообразно производить путем непосредственного сравнения деформации с предельными значениями. Во избежание чрезмерных общих и остаточных перемещений для конструкций, работающих при статических

нагрузках, следует назначать предельное значение относительной деформации $|\varepsilon_n| = 0,004$.

В работе [91] В.И. Сердюков исследовал напряжённо-деформированное состояние стержней из уголков при различных комбинациях внешних силовых воздействий, построив соответствующие поверхности взаимодействия на основе критерия предельных относительных деформаций $\bar{\varepsilon}_{\max} = 4,5$. Данный критерий был получен и обоснован непосредственно в рамках проводимого исследования. Дополнительно автором установлена зависимость между прочностью элемента при растяжении и долей ослабления расчётного сечения отверстиями. Также выявлено, что несущая способность конструкции в значительной мере определяется не только размером повреждения, но и его положением относительно расчётного сечения. Задачу аналогичного содержания, но в приближённой постановке и без использования гипотезы плоских сечений, решил В.Д. Насонкин [77].

А.А. Опланчук [78] сформулировал подход к определению прочности стержней, имеющих локальную погибь полки. В основе данного подхода лежит эквивалентная замена искривлённой полки на прямолинейную с переменной толщиной. Для определённого таким образом сечения вычисляются положение центра тяжести и ориентация главных осей инерции, после чего последующий расчёт ведётся согласно требованиям действующих нормативных документов [46] в предположении упругого поведения материала.

Исследование [118], выполненное S. T. Graves, посвящено изучению влияния начальных геометрических дефектов пластинчатых элементов на несущую способность тонкостенных сварных колонн коробчатого сечения.

Автор выделил два типа начальных искривлений:

1. дефекты, формирующиеся на этапе изготовления отдельных пластин

$$w_0 = \delta_0 \cos(\pi \cdot x/a);$$

2. деформации, возникающие при сварке пластин $w_0 = \delta_0 \cos(\pi \cdot x/a) \cdot \cos(\pi \cdot y/l)$.

В рамках расчётов использовались следующие геометрические параметры: a – ширина пластины, l — длина элемента. Для решения задачи был применён вариационный метод Ритца, при этом учитывалось упругопластическое поведение материала.

Н.Г. Сотников в работе [80] выявил зависимости влияния параметров локального повреждения в виде выреза на несущую способность стальных элементов из спаренных уголков при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом. Лакусса Казимир Симплис Эдо [60] установил аналогичные зависимости для стальных элементов из одиночных уголков. Е.М. Мункуева [76] исследовала зависимости влияния дефектов и повреждений на прочность и устойчивость для элементов крестового сечения, внецентренно сжатых с двухосным эксцентриситетом.

В работе [1] М.В. Асташкин исследовал влияние параметров ослабления в виде выреза на несущую способность стальных двутавровых стержней при внецентренном двухосном сжатии-растяжении и получил кривые взаимодействия предельных усилий.

Дальнейшее развитие метода расчета на прочность как неповрежденных, так и поврежденных элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении с учетом взаимного влияния усилий получило в работах Г. И. Белого [16, 17, 19]. Исследовании прочности проводится обратным методом [9], суть которого заключается в следующем: задаваясь предельным деформированным состоянием в поперечном сечении при помощи алгоритма «сечение» находятся предельные усилия.

Метод, разработанный Г.И. Белым, позволяет применять любые модели материала в условиях многопараметрического нагружения с учётом взаимного влияния действующих усилий, отслеживать историю нагружения, оценивать вклад каждого усилия в формирование напряжённо-деформированного состояния как в отдельности, так и в совокупности с прочими силовыми факторами, а также учитывать влияние дефектов и повреждений.

Обобщённый метод Белого Г.И. [8] дает возможность определять прочностные характеристики стальных конструкций при общем загрузении и позволяет эффективно решать широкий класс практических задач. Наибольшую практическую значимость данный метод приобретает при расчёте несущих элементов реконструируемых объектов, в которых за время жизненного цикла накапливаются разнообразные дефекты и повреждения. Данный метод применяется в настоящей работе для определения напряжённо-деформированных и предельных состояний в сечениях стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями.

1.3 Краткий обзор исследований устойчивости стержней сплошного сечения

Несущая способность конструкции в целом определяется в большинстве случаев устойчивостью составляющих ее элементов. Стержневые элементы, как это уже отмечалось ранее, в силу своей тонкостенности чувствительные к разному рода несовершенствам. Следовательно, проверка устойчивости стальных элементов с дефектами и повреждениями приобретает первостепенное значение при обследовании и техническом перевооружении зданий и сооружений.

Научные основы теории устойчивости сжатых стержней формировались трудами Л. Эйлера, Ф. Энгессера, Ф.С. Ясинского, Б.Г. Галеркина, И.Г. Бубнова, Т. Кармана, Ф. Шенли и ряда других учёных, заложивших концептуальную базу данного направления. Значительный вклад в дальнейшее развитие и совершенствование теории внесли исследования А.Р. Ржаницына [68, 69], А.В. Геммерлинга [37, 38, 39, 40, 41], С.Д. Лейтеса [64, 65], С.П. Тимошенко [99], Г.Е. Бельского [21, 22, 23, 24, 25], Н.С. Стрелецкого [97].

Если обратиться к вопросам оценки несущей способности элементов эксплуатируемых конструкций, которые возникают в связи с их ремонтом или реконструкцией, то выясняется, что методика [95] здесь неприменима.

Однако, несмотря на достаточно глубокую проработанность теории устойчивости стержней с учётом упругопластической работы материала, подавляющее большинство существующих исследований сосредоточено на изучении плоской формы потери устойчивости. В реальных условиях эксплуатации наличие несовершенств нарушает симметрию поперечного сечения и вызывает смещение его центра тяжести, что приводит к общему загрузению и усложняет решение данной задачи. Следовательно, требуется принятие в расчетах на устойчивость пространственно-деформированной схемы.

В основу исследования с использованием пространственно-деформированной схемы может быть положена техническая теория прочности, устойчивости и колебания упругих тонкостенных стержней В.З. Власова [31]. Ключевое достоинство разработанной технической теории заключается в том, что применение обоснованных допущений и двух кинематических гипотез позволило значительно упростить общие уравнения цилиндрических оболочек без ощутимой потери точности результатов. В работах Б.М. Броуде [26, 27, 28], Л.И. Воробьева [32], С.П. Вязьменского [34, 35, 36] и Е.А. Бейлина [3, 4] были получены уравнения равновесия пространственно-деформируемого стержня с учётом различных уточняющих факторов. Опираясь на классическую деформационную теорию тонких стержней Кирхгофа-Клебша, Б.М. Броуде вывел уравнения равновесия, принимающие во внимание различие в кривизнах отдельных волокон. Последующее развитие данного направления нашло отражение в работе Е.А. Бейлина [3], в которой при выводе деформационных уравнений равновесия тонкостенных стержней учитывается различия не только кривиз отдельных волокон, но и различие их наклонов, связанные с кручением.

Опубликованная в 1981 году научная работа В. Д. Насонкина [77] представляет результаты комплексного сопоставления различных деформационных уравнений. В рамках исследования автор разработал упрощённую математическую модель – модифицированную систему уравнений [3]. Предложенный подход

ориентирован на частный класс нагружений стержневых конструкций, но при этом охватывает широкий спектр практически значимых задач.

Вопрос устойчивости сплошностенчатых стержней, подверженных сжатию и изгибу в двух главных плоскостях рассматривался в трудах Ларичева П.Я. [61], Копейкина Ю.Д. [58], Зарифьяна А.З. [50, 51, 52], Чувикина Г.М. [105], Родикова Н.Н. [89], Белого Г.И. [8], а также ряда других исследователей [56, 57, 60, 74, 76, 80, 84].

Вопросам численного моделирования работы стальных колонных двутавров посвящён ряд фундаментальных трудов зарубежных учёных. Так, в публикациях С. Birnstiel, I. Michalos [112], а также А. Harstead, С. Birnstiel и К. Leu [119] детально изучено поведение шарнирно-закреплённых стоек, подверженных внецентренному сжатию относительно обеих главных осей. В свою очередь, развитие теоретической базы для оценки несущей способности широкополочных двутавровых колонн нашло отражение в исследованиях W. F. Chen [113], а также его совместной работе с Т. Atsuta [114].

Изучение научных публикаций по устойчивости тонкостенных стальных стержней с дефектами и повреждениями позволяет выделить два ведущих тематических направления, по которым систематизируются существующие исследования.

В рамках *первого* направления локально ослабленный участок стержня представляется в виде совокупности взаимодействующих изогнутых пластин. Их типология определяется исходя из принятых граничных условий и включает две основные разновидности: пластина-стенка с произвольным характером закрепления продольных краёв и пластина-полка, один продольный край которой защемлён, а противоположный свободен. Ввиду того что длина рассматриваемых пластин существенно меньше длины стержня в целом, нагруженные торцевые кромки принимаются шарнирно опёртыми.

В числе работ данного направления, посвящённых расчётным методам оценки несущей способности локально повреждённых стержневых элементов, заслуживают внимания исследования А. Neut [124], S.E. Svensson [130], А. В. Ильяшенко [53, 54, 55].

А. Neut [124] исследовал зависимость влияния параметров локальной погиби и общего искривления оси элемента на местную и общую устойчивость сжатых стержней коробчатого сечения. В результате проведённых исследований установлено, что искривления оси элемента оказывают несущественное влияние на несущую способность колонн, тогда как определяющим фактором снижения предельной нагрузки выступает локальное искривление пластинок, составляющих поперечное сечение.

В исследовании [130] Svensson S.E. представил численные решения уравнений, описывающих взаимодействие местных и общих форм потери устойчивости внецентренно сжатых стержней коробчатого сечения, имеющих дефект в виде начального искривления оси.

Закритическое поведение тонкостенных элементов коробчатого и крестового сечений стало предметом исследования Н.Р. Lee и Р.Д. Harris в работе [123]. В рамках разработанной расчётной схемы элементы колонны коробчатого сечения представлялись пластинами с шарнирным закреплением по всему периметру, а крестовое сечение моделировалось пластиной с одним свободным и одним шарнирно закреплённым продольным краем. Интегрирование нелинейных уравнений устойчивости в диапазоне упругой работы производилось методом Ньютона-Рафсона, тогда как учёт упругопластического деформирования осуществлялся с использованием МКЭ.

М.Д. Корчак [59] исследовал воздействие местной начальной погиби на несущую способность сквозных стержней. По итогам численного анализа автором сделан вывод о том, что интенсивность влияния повреждений снижается по мере возрастания гибкости стержня, а при значениях гибкости в диапазоне 20-30 общее искривление оси элемента допускается не принимать во внимание при определении

несущей способности колонны. В работах [53, 54, 55] А.В. Ильяшенко исследовала зависимость влияния механической гибели элементов, составляющих поперечное сечение, на несущую способность стержневых элементов при внецентренном сжатии. Особое внимание уделено закритическим стадиям сопротивления, возникающим после местной потери устойчивости. Математическая модель построена на основе уравнений теории Кармана с учётом условий совместности деформаций и равновесия системы. К числу основных результатов, полученных в ходе исследования, относится установленный факт снижения несущей способности элемента на 30–50% вследствие наличия локальной гибели.

Суть *второго* направления исследований заключается в использовании экспериментальных данных или упрощенных моделей для оценки влияния локальных повреждений на общую устойчивость стержня.

А.Ю. Чижевский [104] сформировал расчётную модель поведения сжатых стержней с вырезами, опираясь на результаты натурных испытаний. Стержень в предложенной схеме представляется как система из двух абсолютно жёстких элементов, соединённых между собой и закреплённых на жёсткой опоре через упругопластические вставки.

Модель стержня базируется на ряде допущений:

1. Прогиб считается пренебрежимо малым;
2. Для описания поведения упругопластических элементов используется идеализированная модель Прандтля, исключаяющая учёт стадии упрочнения материала.;
3. В расчётах применяется гипотеза плоских сечений;
4. Предполагается устойчивость плоской формы изгиба;
5. Изгибающие моменты вдоль длины упругопластического элемента считаются постоянными;
6. Влияние концентрации напряжений у краёв выреза в рамках модели не учитывается.

Сформулированная на указанных допущениях методика позволила определить несущую способность сжатых стержней с вырезами применительно к ряду практически значимых задач с учётом геометрических параметров повреждения - его глубины, длины и местоположения по длине стержня.

Э.П. Хороженова [101] провела экспериментальное исследование, направленное на выявление предельно допустимого прогиба сжатых стержней с местными погибями, превышение которого ведёт к утрате несущей способности конструкции. В качестве образцов были приняты центрально сжатые тонкостенные стержни двух типов поперечного сечения (крестового и двутаврового). По результатам проведённого исследования автором выявлено, что предельный крутящий момент уменьшается при увеличении параметров местной погиби.

В работе А.И. Титакова [100] представлена приближённая методика оценки предельной величины погиби полки двутаврового сечения. Установлено, что зависимость величины погиби от координаты по ширине полки описывается функцией:

$$f(x) = f_0(1 - \cos \frac{\pi x}{b}),$$

где f_0 – величина погиби на кромке полки, x – координата полки с погибью ($0 \leq x \leq \frac{b}{2}$), b – ширина полки.

На основе формул сопротивления материалов автор определил предельные значения погиби, которые составили 3,7-3,9 толщины полки для сжатых элементов, а для сжато-изогнутых 3,3-3,4 t . Автором отмечается, что в сечениях с расчётным моментом или близким к нему погибь не допускается. Полученные результаты носят приближённый характер и требуют дополнительного уточнения.

В исследованиях [92] Ю. Н. Сеницына предложен подход к расчёту ослабленных стержней: сначала определяется положение центра тяжести в ослабленном сечении, а смещение этого центра относительно центра тяжести исходного (неослабленного) сечения принимается за эксцентриситет. После этого

стержень рассчитывается как внецентренно сжатый в соответствии с нормативами [95]. Однако в данной методике не учитывается локальный характер дефекта. Суть проблемы в том, что преломление линии центров происходит исключительно в зоне повреждения, из-за чего поведение стержня и механизм потери устойчивости существенно отличаются от идеализированных случаев. Экспериментальное сравнение центрально сжатых стержней с дефектами и без них подтвердило эти различия. Тем не менее ограниченный объём проведённых испытаний не позволил автору детально изучить, как параметры локальной погиби влияют на несущую способность стержня.

Н.М. Любимов и Н.Т. Чернышев [68] исследовали характер влияния незначительных искривлений на работу растянутых стержневых элементов ферм. В ходе экспериментального исследования авторами зафиксировано, что снижение несущей способности стержней напрямую определяется геометрическими параметрами погиби и может достигать 20%.

В исследованиях [78, 79] А.А. Опланчук разработал алгоритмы расчёта прокатных уголков с локальным ослаблением сечения в виде погиби. Ключевой принцип метода заключается в эквивалентной замене погиби на сечение с вырезом, жёсткость которого принимается постоянной по всей длине ослабленной зоны. Тем не менее оценка устойчивости осуществляется при упругой работе материала на основе метода расчета стержней с ступенчато-переменным сечением, данная особенность приводит к занижению несущей способности элемента и является принципиальный недостаток рассматриваемого метода.

Накопленный объём экспериментальных данных в рамках *второго* направления оказался недостаточным для построения надёжных эмпирических зависимостей. Теоретические же разработки, несмотря на достаточно корректный учёт влияния местных повреждений, в большинстве случаев ограничивались решением задачи общей устойчивости в пределах упругого деформирования.

Г. И. Белый разработал расчётную модель устойчивости упругих стержней, охватывающую изгибную, изгибно-крутильную и пространственную формы

потери устойчивости, опираясь на сочетание деформационного расчёта с частными решениями недеформационных и бифуркационных задач, а также на применение метода Бубнова-Галёркина. В рамках созданной модели нагрузки разделяются на активные и параметрические: при росте активных нагрузок наблюдается лишь увеличение прогибов стержня без изменения форм равновесия, тогда как параметрические нагрузки после достижения определённого уровня вызывают бифуркацию (появление новых форм равновесия). Учёт пластических деформаций выполнен на основе деформационной теории пластичности А. А. Ильюшина с применением алгоритма «сечение», что позволило выявить дополнительные перемещения точек оси стержня и углы закручивания, обусловленные нелинейным поведением материала.

Важно отметить, что прямой [7] и обратный [8] численно-аналитические методы, разработанные Г.И. Белым, как показано в работах [1, 57, 66, 74, 84, 89, 93], позволяют решить широкий спектр новых задач устойчивости несущих элементов конструкций.

Исследования устойчивости стальных стержневых конструкций, имеющих дефекты и повреждения рассматривались в работах ряда авторов. В частности, Сотниковым Н.Г. [94] исследовались зависимости влияния параметров локального повреждения в виде выреза на устойчивость элементов из спаренных уголков при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом, а Эдо Л.К. [60] получил те же зависимости для стержней из одиночных уголков. Мункуева Е.М. [76] исследовала зависимости влияния дефектов и повреждений на устойчивость элементов крестового сечения при действии продольной силы с двухосным эксцентриситетом. В исследованиях [57] Кацеф Э.Б. установлены зависимости влияния параметров краевого выреза и его расположения по длине решетчатой колонны.

В числе значимых зарубежных исследований можно отметить ряд научных работ. Так, в работе [117] анализ устойчивости тонкостенной стальной колонны показал, что уменьшение толщины стенок поперечного сечения из-за

коррозионного износа существенно снижает значения предельной силы. В исследованиях [131] оценивается остаточная прочность и устойчивость стальных двутавровых балок при потере толщины элементов сечения из-за коррозионных повреждений. Рассматриваются различные формы потери устойчивости (включая изгибно-крутильную форму) в зависимости от величины повреждения. Также стоит отметить другие работы, направленные на исследования устойчивости поврежденных стержней [110, 125, 126, 127, 132].

Однако результаты, полученные в этих исследованиях, не могут быть экстраполированы на элементы с иными типами поперечного сечения. Кроме того, остаётся практически неизученным влияние коррозионного износа на потерю местной устойчивости, которая, в свою очередь, является ключевым фактором, существенно снижающим общую устойчивость элементов эксплуатируемых стальных конструкций.

1.4 Выводы по главе

Методы расчета в действующих нормативных документах, не учитывают влияние дефектов и повреждений на несущую способность, а имеющиеся рекомендации в пособии по проектированию усилия стальных конструкций в большей степени относятся к элементам эксплуатируемых стальных конструкций покрытий из уголков. Указанные рекомендации не могут быть распространены на другие типы поперечных сечений и в значительной степени не охватывают весь комплекс факторов, которые могут оказать существенное влияние на несущую способность элементов стальных конструкций.

Стоит отметить, что в опубликованных исследованиях детально изучено влияние дефектов и повреждений таких, как искривление оси, механические погиби и вырезы на работу элементов из уголков и элементов крестового сечения, однако они не могут быть экстраполированы на элементы других типов сечений.

На основе выполненного анализа исследований прочности и устойчивости стальных сплошностенчатых элементов, имеющих наиболее распространённые дефекты и повреждения, можно сформулировать ряд ключевых выводов:

1. Для оперативного принятия решений при оценке технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений необходимо иметь метод расчета, который позволил бы обосновано и достоверно выявлять фрагменты конструкций и (или) их элементы, нуждающиеся в немедленном усилении, и элементы с потенциально неопасными дефектами и повреждениями.

2. Существующие исследования в области стальных конструкций не дают достаточно полного представления о влиянии дефектов и повреждений на несущую способность их элементов, что препятствует разработке надёжного практического метода расчёта их прочности и устойчивости.

3. Требуется создать быстродействующий метод расчета, позволяющий оперативно оценивать влияние дефектов и повреждений на прочность и устойчивость элементов стальных конструкций.

4. На основании разработанного метода расчета построить практические рекомендации по расчетной оценке несущей способности как по прочности, так и по общей устойчивости.

ГЛАВА 2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫЕ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В СЕЧЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЛОКАЛЬНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

В главе рассматривается исследование прочности элементов эксплуатируемых стальных конструкций, имеющих наиболее распространённые дефекты и повреждения, в котором учитывается взаимное влияние усилий на развитие пластических деформаций. С целью унификации решения предложен способ приведения разных типов повреждений (местные погиби элементов сечения, коррозия, приводящая к потере местной устойчивости, а также вырывы, истирания и др.) к эквивалентному ослаблению сечения в виде выреза. Определено влияние места расположения повреждения в сечении относительно вектора действующих усилий на прочность. Даны практические рекомендации по совершенствованию расчета на прочность.

2.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения

Рассматривается наиболее распространенный в практике строительства элемент двутаврового сечения при общем загрузении, имеющий обобщенное ослабление сечения (см. Рисунок 2.1), которое фактически нарушает его симметрию и приводит к смещению центра тяжести, что усложняет решение данной задачи. Учитывая последнее решение будет производиться как для неослабленного сечения с дополнительным догрузением элемента фиктивными силами, компенсирующими данное ослабление.

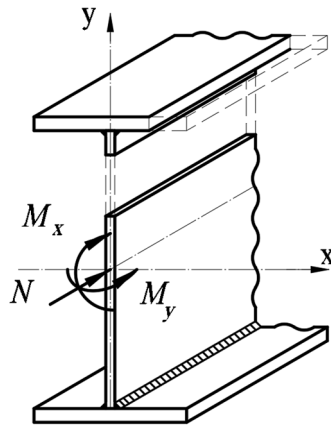


Рисунок 2.1 Схема сечения, ослабленного вырезами

Определение напряженно-деформированных и предельных состояний поврежденных элементов выполняется при соблюдении следующий общепринятых гипотез. Считается, что деформации подчиняются тем же гипотезам, которые были представлены в технической теории расчета тонкостенных стержней В.З. Власова [31], к которым относятся гипотеза о не надавливании продольных волокон друг на друга, а также гипотеза плоских сечений в сочетании с гипотезой секториальных площадей. Контур поперечного сечения принимается недеформируемым, что предполагает обеспечение местной устойчивости отдельных элементов поперечного сечения. При этом нормальные напряжения по толщине пластинок распределяются равномерно.

Зависимость между напряжениями и деформациями задаётся нелинейно-упругой моделью материала:

$$\bar{\sigma} = \bar{\varepsilon} \cdot \bar{E}_{ck}, \quad (2.1)$$

где $\bar{\sigma} = \sigma / R_y$ и $\bar{\varepsilon} = \varepsilon E / R_y$ напряжения и деформации в относительных величинах.

$\bar{E}_{ck} = \bar{\sigma} / \bar{\varepsilon}$ – секущий модуль.

Указанная зависимость устанавливается на основе унифицированной диаграммы работы стали $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ с физическим пределом текучести. В качестве критерия предельного состояния принята предельная пластическая деформация $\bar{\varepsilon}_{\text{lim},p} = \varepsilon_{\text{lim},p} E / R_y = 3$ при достижении которой дальнейшая эксплуатация конструкции становится опасной либо нецелесообразной [2].

2.2 Переход от локальных повреждений к эквивалентному ослаблению в виде выреза

Как отмечалось ранее, с целью унификации решения различные типы повреждений будут приводиться к эквивалентному ослаблению в виде выреза.

Рассмотрим коррозионное повреждение, вызывающее уменьшение толщины стенки и поясов на Δ_f, Δ_w ($t_f^* = t_f - \Delta_f, t_w^* = t_w - \Delta_w$), увеличивающее условные гибкости $\bar{\lambda}_f^*$ и $\bar{\lambda}_w^*$, предельные значения которых $\bar{\lambda}_u = f(\bar{\varepsilon}_1, \alpha)$ приведены в табл. 21 СП 294 [96] или табл. 3.16 [75], в зависимости от условий опирания продольных кромок и характера деформированного состояния пластинки описываемого параметрами $\bar{\varepsilon}_1 = \max(\bar{\varepsilon}_s, \bar{\varepsilon}_e)$, $\bar{\varepsilon}_2 = \min(\bar{\varepsilon}_s, \bar{\varepsilon}_e)$ и $\alpha = (\bar{\varepsilon}_1 - \bar{\varepsilon}_2)/\bar{\varepsilon}_1$. В соответствии с гипотезой плоских сечений и секториальных площадей распределение деформаций по ширине пластинки происходит линейно. Таким образом по значениям деформаций на крайних волокнах $\bar{\varepsilon}_f$ и $\bar{\varepsilon}_l$ определяем деформации на границах рассматриваемой пластинки $\bar{\varepsilon}_s$ и $\bar{\varepsilon}_e$ (см. Рисунок 2.2).

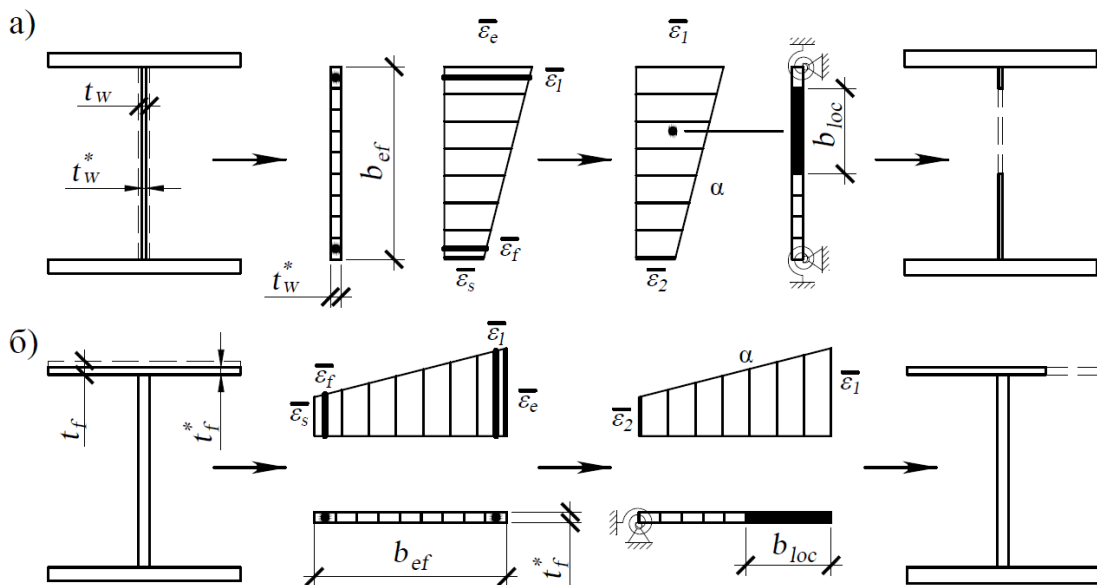


Рисунок 2.2 Определение зоны редукции а) – стенки; б) – полки

При значениях условных гибкостей пластинок элемента, превышающих допустимые ($\bar{\lambda}_f^* > [\bar{\lambda}_f], \bar{\lambda}_w^* > [\bar{\lambda}_w]$) происходит потеря их устойчивости. Наиболее нагруженная сжатая часть ширины любой пластинки, выходящая за рамки

определяемой предельной ею гибкостью, является нерабочей и считается ослаблением. Это позволяет перейти от запредельного состояния пластинки к её ослаблению (редукции).

Ширину участка пластины, который выключается из работы и считается ослаблением определяем по формуле:

$$b_{loc} = b_{ef} \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_u}{\bar{\lambda}} \right), \quad (2.2)$$

где $\bar{\lambda} = \frac{b_{ef}}{(t-\Delta)} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – приведенная гибкость пластины поврежденной коррозией.

Местные погиби элементов, составляющих поперечное сечение с параметром (см. Рисунок 2.3) f_0 приводится к эквивалентному вырезу с параметром b_{loc} . На первом этапе производится замена искривлённой полки на прямолинейную с переменной толщиной (см. Рисунок 2.3 а) в соответствии с [48].

$$t_p = \frac{t^3}{t^2 + 3,4 \cdot f_0^2 \cdot \left(\frac{z}{b_{ef}} \right)^4}, \quad (2.3)$$

где t – фактическая толщина элемента; f_0 – стрелка погиби; z – расстояние от начала свеса; b_{ef} – ширина свеса.

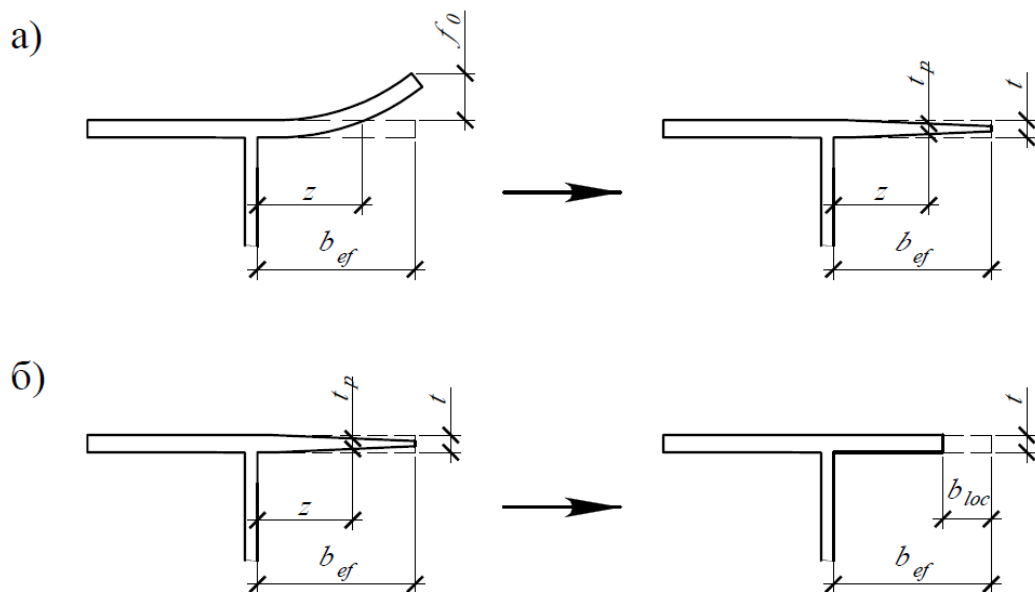


Рисунок 2.3 Схемы эквивалентных ослабленных сечений а) – 1-й этап эквивалентного перехода; б) – 2-ой этап

На втором этапе выполняется эквивалентная замена сечения с переменной толщиной полки на сечение с краевым вырезом (см. Рисунок 2.3 б).

Ширина эквивалентного краевого выреза определяем по формуле:

$$b_{loc} = b_{ef} \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_u}{\bar{\lambda}_p} \right), \quad (2.4)$$

где $\bar{\lambda}_p = \frac{b_{ef}}{t_p} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$ – приведенная гибкость пластины переменной толщины.

2.3 Обратный метод решения задач прочности стержневых элементов, имеющих локальные повреждения.

Определение прочности поврежденных элементов, традиционными методами требуют от инженера выполнения многочисленных итерационных процессов на каждом шаге нагрузки: определять положения центра тяжести сечения; углы поворота главных осей и приведение к ним действующих усилий, что является весьма трудоемким процессом. Поэтому в данной работе решение задачи прочности будет производиться как для неповрежденного элемента с дополнительным догрузением фиктивными усилиями, компенсирующими повреждение. Предлагается обратное численное решение прочности при заданном предельном (по предельной деформации $\bar{\varepsilon}_{\max} = \bar{\varepsilon}_{\lim,p} + 1 = 4$) деформированном состоянии, которое было апробировано при исследовании прочности трубобетонных [12], стальных тонкостенных холодногнутых [13], элементов конструкций, а также запредельных состояний двутавровых элементов и прямоугольных труб [14]. При этом в отличие от расчета на прочность по СП 16.13330.2017 [95], развитие пластических деформаций в предлагаемом решении учитывается при совместном взаимодействии всех действующих усилий, тем самым позволяет определить резервы прочности.

Для удобства построения алгоритма решения задачи задаем предельное деформированное состояние по критерию полной предельной деформации ($\bar{\varepsilon}_{\max} = \bar{\varepsilon}_{\lim,p} + 1 = 4$) наиболее напряженного волокна в сечении двутаврового

элемента, которое определяется при действии «упругих» предельных усилий (см. Рисунок 2.4 а): продольной силы N^* и изгибающих моментов M_x^* и M_y^* , действующими в двух главных плоскостях.

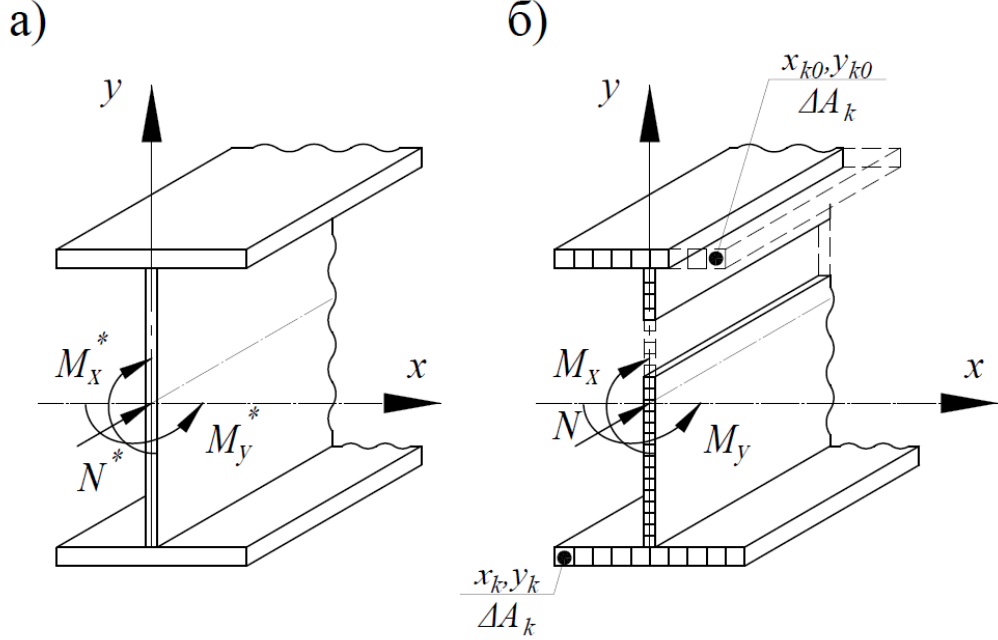


Рисунок 2.4 Схема действующих усилий в элементе: а) полное сечение; б) поврежденное сечение.

В целях обобщения, решение проводится в безразмерных параметрах, в котором за общий параметр загрузки принимается коэффициент продольной силы $\varphi^* = N^* / R_y A$. Тогда предельное деформированное $\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varepsilon^*(\bar{x}, \bar{y}) E / R_y$ и напряженное состояние $\bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \sigma^*(\bar{x}, \bar{y}) E / R_y$ при неограниченно упругой работе материала получают один вид:

$$\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (2.5)$$

где $\varphi^* = \bar{\varepsilon}_{\max} \cdot (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x})^{-1}$; $\bar{\varepsilon}_{\max} = 4$; $m_x^* = e_y^* / \rho_x$ ($e_y^* = M_x^* / N^*$), $m_y^* = e_x^* / \rho_y$ ($e_x^* = M_y^* / N^*$) – относительные эксцентриситеты продольной силы; $\rho_x = W_{x,c} / A$, $\rho_y = W_{y,c} / A$ – ядровые расстояния; $W_{x,c}$, $W_{y,c}$ – моменты сопротивления наиболее напряженного волокна, имеющего координаты x_* , y_* ; $\bar{x} = x / x_*$, $\bar{y} = y / y_*$ – относительные координаты волокон.

Для реализации численного решения полное сечение разбивается на n и ослабления на n_b достаточно малых дискретных площадок ΔA_k с координатами центра тяжести x_k, y_k и x_{ko}, y_{ko} соответственно (см. Рисунок 2.4 б).

Следуя [10], воспользуемся гипотезой плоских сечений, в соответствии с которой относительные деформации любого k -ого волокна можно представить в виде:

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\varepsilon}_0 - \bar{v}'' \cdot \tilde{y}_k - \bar{u}'' \cdot \tilde{x}_k, \quad (2.6)$$

где $\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0 E / R_y = \varphi^*$ – приведенная относительная деформация оси стержня с неослабленным сечением; $\bar{v}'' = v'' \rho_x E / R_y = -\varphi^* m_x^*$ и $\bar{u}'' = u'' \rho_y E / R_y = -\varphi^* m_y^*$ – безразмерные параметры кривизн оси элемента; v, u – перемещения относительно осей x и y соответственно; $\tilde{x}_k = x_k / \rho_y$; $\tilde{y}_k = y_k / \rho_x$ – относительные координаты центра тяжести k -ой дискретной площадки.

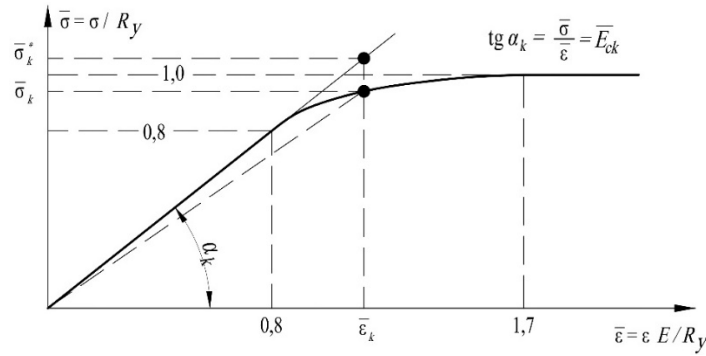


Рисунок 2.5 Унифицированная диаграмма работы стали

Тогда, используя (2.6) и унифицированную диаграмму работы стали с физическим пределом текучести $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ (см. Рисунок 2.5) с помощью алгоритма «сечение» [14] определим предельные параметры усилий, соответствующих заданному деформационному состоянию (2.5):

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{oc} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \right); \\ m_x^{oc} &= \frac{\varphi^*}{\varphi^{oc}} \left(-\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{T}_{x,ef} - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{T}_{xy,ef} \right); \\ m_y^{oc} &= \frac{\varphi^*}{\varphi^{oc}} \left(-\bar{S}_y - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{T}_{xy,ef} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{T}_{y,ef} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где $\bar{A}_{ef} = 1 - \bar{A}_{pl} - \bar{A}_{loc}$ – относительная рабочая площадь «упругого» сечения;

$\bar{A}_{pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k$, $\bar{A}_{loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \Delta \bar{A}_k$ – площадь ослабления сечения развитием

пластических деформаций и вырезом соответственно; $\bar{S}_x = \bar{S}_{x,pl} + \bar{S}_{x,loc}$,

$\bar{S}_y = \bar{S}_{y,pl} + \bar{S}_{y,loc}$ – относительные статические моменты относительно осей x и y

соответственно; $\bar{S}_{x,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k$, $\bar{S}_{y,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \Delta \bar{A}_k$ –

относительные статические моменты ослабления развитием пластических

деформаций; $\bar{S}_{x,loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{y}_{k0} \Delta \bar{A}_k$, $\bar{S}_{y,loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{x}_{k0} \Delta \bar{A}_k$ – относительные

статические моменты выреза; $\bar{I}_{x,ef} = I_x / (\rho_x^2 A) - \bar{I}_{x,pl} - \bar{I}_{x,loc}$,

$\bar{I}_{y,ef} = I_y / (\rho_y^2 A) - \bar{I}_{y,pl} - \bar{I}_{y,loc}$, $\bar{I}_{xy,ef} = \bar{I}_{xy,pl} + \bar{I}_{xy,loc}$ – относительные моменты

инерции рабочей части сечения и центробежные моменты соответственно;

$\bar{I}_{x,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k$, $\bar{I}_{y,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k$ – относительные моменты

инерции ослабления развитием пластических деформаций; $\bar{I}_{x,loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{y}_{k0}^2 \Delta \bar{A}_k$,

$\bar{I}_{y,loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{x}_{k0}^2 \Delta \bar{A}_k$ – моменты инерции выреза; $\bar{I}_{xy,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k$,

$\bar{I}_{xy,loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{x}_{k0} \tilde{y}_{k0} \Delta \bar{A}_k$ – центробежные моменты ослабления развитием

пластических деформаций и выреза соответственно; $\Delta \bar{A}_k = \Delta A_k / A$; A – площадь

неослабленного сечения; $E_{ck} = \text{tg} \alpha_{ck}$ – относительный секущий модуль.

Для неповрежденных элементов параметры φ , m_x , m_y определяются по 2.8, в которых относительные характеристики ослабления сечения с вырезом (индекс loc) равны нулю, тогда:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi^* \left((1 - \bar{A}_{pl}) - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,pl} - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_{y,pl} \right); \\ m_x &= \frac{\varphi^*}{\varphi} \left(-\bar{S}_{x,pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \left[I_x / (\rho_x^2 A) - \bar{I}_{x,pl} \right] - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,pl} \right); \\ m_y &= \frac{\varphi^*}{\varphi} \left(-\bar{S}_{y,pl} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,pl} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \left[I_y / (\rho_y^2 A) - \bar{I}_{y,pl} \right] \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Имея предельные значения параметров усилий φ, m_x, m_y проверку прочности неповрежденных элементов, можно свести к виду:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1, \quad (2.9)$$

$$\text{где } c_p = \varphi(1 + m_x + m_y) > 1. \quad (2.10)$$

При этом следует заметить, что вместо используемых в [46] трех коэффициентов n, c_x, c_y получен один - c_p .

Влияние повреждений представим коэффициентом:

$$K_{oc} = \varphi^{oc} (1 + m_x^{oc} + m_y^{oc}) [\varphi(1 + m_x + m_y)]^{-1}, \quad (2.11)$$

где $\varphi^{oc}, m_x^{oc}, m_y^{oc}$ – предельные параметры усилий поврежденного стержня; φ, m_x, m_y – тоже неповрежденного.

Тогда проверка прочности поврежденного сечения приобретает вид:

$$\frac{1}{\gamma_c R_y c_p K_{oc}} \left(\frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y_* + \frac{M_y}{I_y} x_* \right) \leq 1, \quad (2.12)$$

2.4 Алгоритм решения обратной задачи прочности стальных элементов, имеющих повреждения

Решение обратной задачи прочности поврежденных элементов стальных конструкций в заданном сечении сводится к определению относительных эксцентриситетов продольной силы φ , m_x и m_y . Эти параметры определяются для конкретного деформированного состояния, характеризуемого известными величинами m_x^* и m_y^* , которым соответствует значение $\varphi^* = 4 \cdot (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x})^{-1}$.

Ход решения:

1. Устанавливаются исходные данные (параметры поперечного сечения и повреждения, физические характеристики материала, относительные эксцентриситеты приложения продольной силы m_x^0 и m_y^0).

2. Поперечное сечение разбивается на малые дискретные площадки.

3. Определяются центры тяжести и площади дискретных площадок.

4. Вычисляются геометрические характеристики поперечного сечения элемента.

5. На основе заданных m_x^* и m_y^* определяются φ^* , $\bar{\varepsilon}_k$ и φ . Далее вычисляются эксцентриситеты m_x и m_y , которые сравниваются с заданными m_x^0 и m_y^0 . Если полученные значения эксцентриситетов совпадают ($m_x = m_x^0, m_y = m_y^0$), расчет считается завершенным, а φ принимается как искомое решение.

Алгоритм решения представлен блок-схемой на Рисунок 2.6.

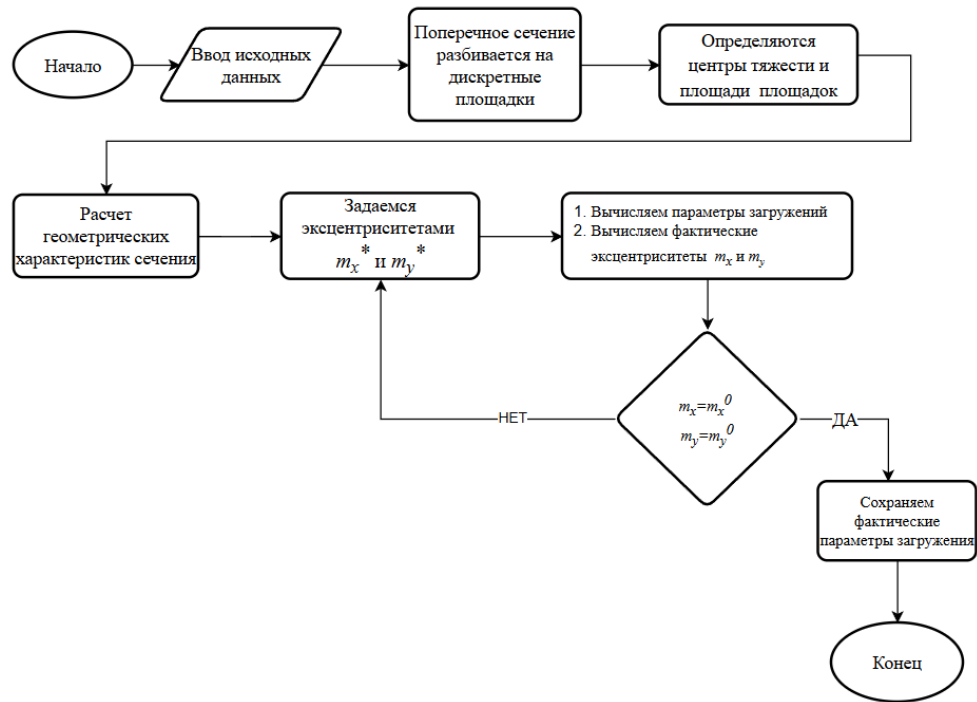


Рисунок 2.6 Алгоритм решения задачи прочности поврежденных элементов

2.5 Влияние локальных повреждений на прочность стальных конструкций

На примере расчета прочности поврежденного двутаврового элемента покажем зависимость влияния краевого выреза от места его расположения относительно вектора действующих усилий. Для этого строятся кривые для двутаврового элемента, которые иллюстрируют изменение предельного значения продольной силы, как параметра загрузки, от направления двухосного эксцентриситета.

Продольная сила N вызывает в сечении изгибающие моменты $M_x = N \cdot e_y$ и $M_y = N \cdot e_x$. Направление двухосного эксцентриситета, определяемое углом α между осью x и вектором двухосного эксцентриситета в плоскости сечения, изменяется с шагом 5° . Соответственно, расчётные кривые построены по 72 точкам. Значение предельной силы представлены по параметру $\bar{N} = N / A \cdot R_y$.

На рисунке 2.7 представлены кривые для поврежденного (сплошные линии) и неповрежденного (штрихпунктирные) элемента при различных значениях двухосного эксцентриситета $m = e / \rho_y$.

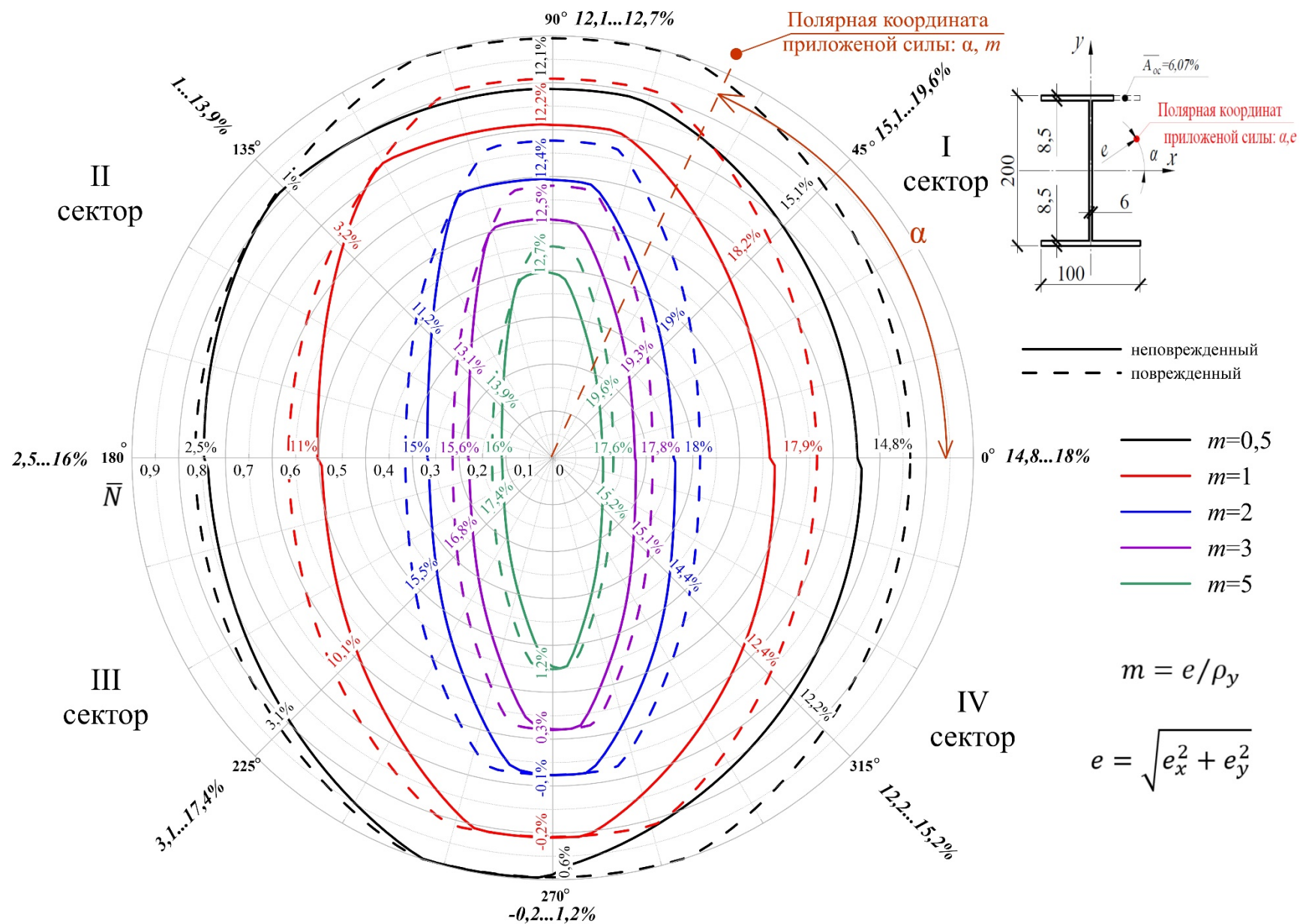


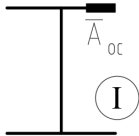
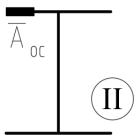
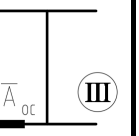
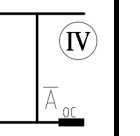
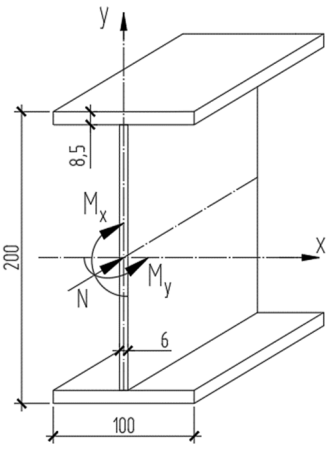
Рисунок 2.7 Зависимость предельной силы от направления двухосных эксцентриситетов

Снижение прочности характеризуется коэффициентом

$$K_{oc} = \varphi^{oc} (1 + m_x^{oc} + m_y^{oc}) [\varphi(1 + m_x + m_y)]^{-1},$$

определяемым как отношение прочности поврежденного элемента $\varphi^{oc} (1 + m_x^{oc} + m_y^{oc})$ к неповрежденному $\varphi(1 + m_x + m_y)$.

Таблица 2.1 Коэффициент влияния ослабления сечения K_{oc} на прочность

Схема нагружения	Относительные эксцентриситеты		Место расположения ослабления пл. 6,07%			
	m_x	m_y				
	0,5	0,5	800	1072	870	873
		1	808	1057	861	884
		3	795	952	861	887
		5	777	947	851	878
	1	0,5	800	1073	848	904
		1	810	1061	856	886
		3	801	956	861	891
		5	786	949	855	884
	2	0,5	798	1075	836	1096
		1	804	1065	844	913
		3	802	987	856	890
		5	794	953	856	889
	4	0,5	790	1077	821	1187
		1	793	1070	827	1144
		3	796	999	841	909
		5	795	976	848	892

Примечание: Значения коэффициентов K_{oc} увеличены в 1000 раз.

Анализируя представленные на рисунке 2.7 и таблице 2.1 результаты можно сделать следующие выводы:

1. Повреждение площадью 6,07%, находящееся в наиболее нагруженных зонах (сектор I и III), снижает прочность соответственно на 19,2...22,3% и 13...17,9%, что в 2,2...3,7 раз больше повреждения.

2. В менее нагруженных секторах II и IV, в зависимости от m_x , m_y и их соотношений, можно наблюдать, как снижение (2,4...12,7%), так и увеличение (5,7...18,7%) прочности. Последнее объясняется тем, что ослабление, например в

секторе II приводит к смещению центра тяжести сечения, уменьшая тем самым значения относительных эксцентриситетов $m_y = 0,5...1$, что в совокупности с его разгружающим действием приводит к повышению прочности.

Пример расчета прочности поврежденного двутаврового элемента, а также многие другие исследования (см., [76, 80]) показали, что наихудшее влияние оказывают повреждения, находящиеся в наиболее нагруженной зоне. Отсюда следует, необходимость выполнения дополнительной проверки прочности по специальной комбинации расчетных усилий, составленной применительно к месту расположения повреждения.

2.6 Сравнение полученных результатов расчета на прочность по предлагаемому алгоритму с результатами расчетов по методу конечных элементов

С помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS численно решалась задача прочности для сравнения результатов, полученных алгоритмом представленном в пункте 2.3 [70]. Расчет производился в модуле ANSYS Static structural.

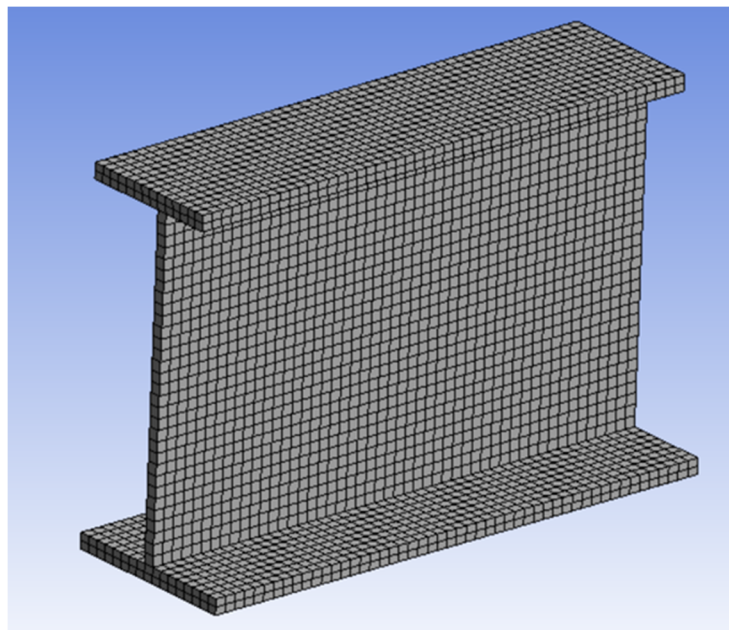


Рисунок 2.8 Общий вид модели стержня

На расчётную модель были наложены следующие граничные условия: свободный поворот опорных сечений относительно осей y и x , поворот относительно оси z запрещен, отсутствуют перемещения относительно осей x , y , z для опорного сечения «Опора» и x , y для «Пресс».

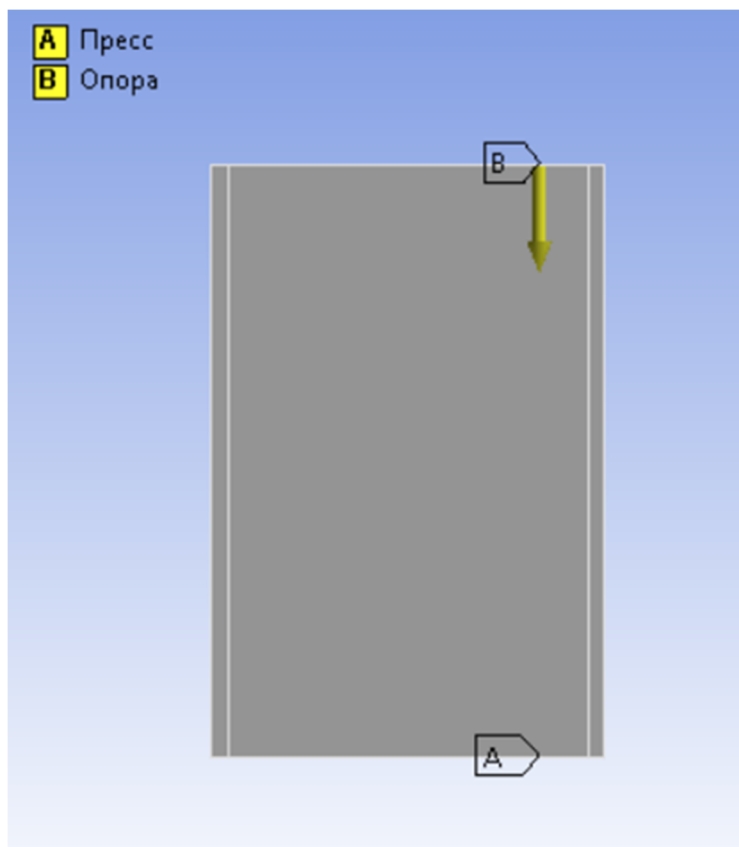
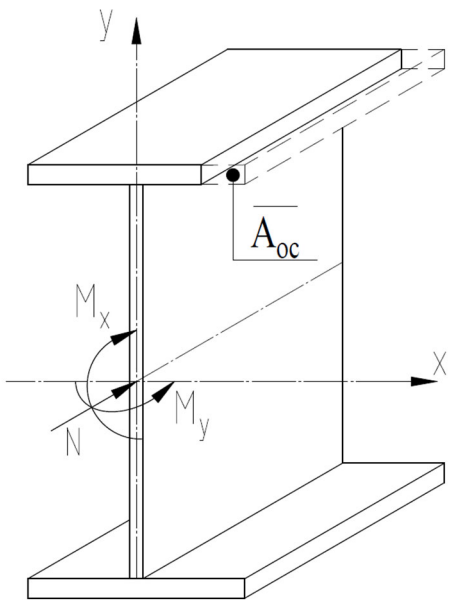
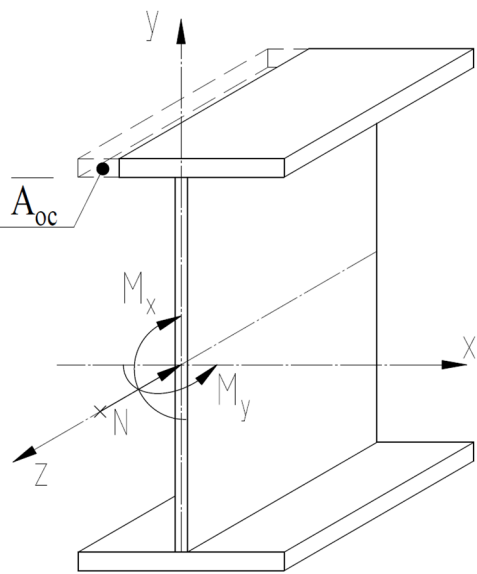


Рисунок 2.9 Граничные условия конечно-элементной модели стержня

Материал стержней принят – сталь С245 с пределом текучести 240 Н/мм^2 , по унифицированной диаграмме работы стали [11] принята зависимость $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$. Геометрическая модель разбивалась на упорядоченную четырехугольную сетку. Результаты расчетов сведены в Таблица 2.2.

Таблица 2.2 Сравнение результатов расчетных методик,

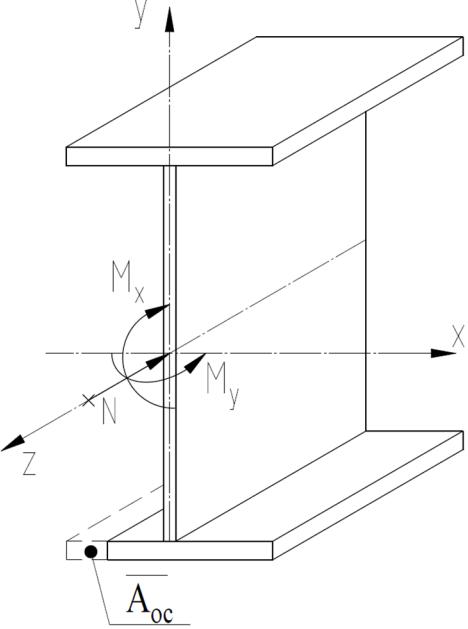
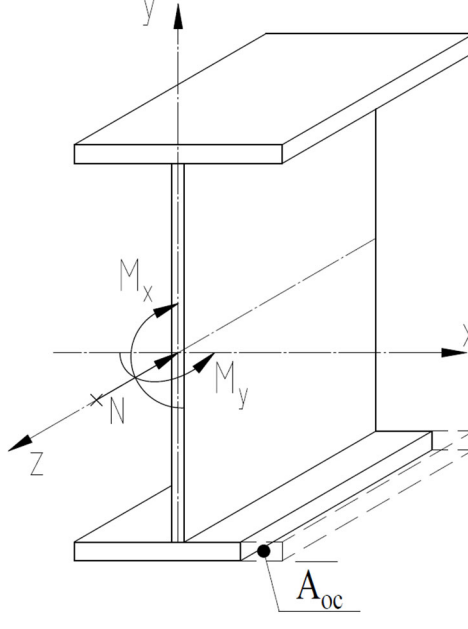
при $\bar{A}_{oc} = A_{oc} / A \cdot 100\% = 6,07\%$

Загружение	m_x	m_y	φ	ФМКЭ	$(1 - \varphi / \text{ФМКЭ})$
	0,5	0,5	640	642	0,273%
		1,0	574	583	1,577%
		3,0	338	353	4,627%
		5,0	222	234	5,159%
	1,0	0,5	500	502	0,309%
		1,0	470	478	1,613%
		3,0	304	317	4,404%
		5,0	211	223	5,373%
	2,0	0,5	343	345	0,462%
		1,0	327	331	1,368%
		3,0	242	250	3,351%
		5,0	185	194	4,775%
	4,0	0,5	204	206	0,649%
		1,0	194	198	1,025%
		3,0	165	168	2,190%
		5,0	139	142	2,484%
	0,5	0,5	644	649	0,768%
		1,0	642	645	0,459%
		3,0	378	388	2,512%
		5,0	237	243	2,602%
	1,0	0,5	507	511	0,838%
		1,0	504	508	0,682%
		3,0	358	365	2,008%
		5,0	232	238	2,492%
	2,0	0,5	354	357	1,041%
		1,0	352	356	1,089%
		3,0	300	305	1,577%
		5,0	215	219	1,941%
	4,0	0,5	219	220	0,670%
		1,0	219	222	1,462%
		3,0	202	203	0,453%
		5,0	170	173	1,439%

Примечание: значения φ_{ef} и $\varphi_{МКЭ}$ увеличены в 1000 раз.

Продолжение Таблицы 2.2 Сравнение результатов расчетных методик,

при $\bar{A}_{oc} = A_{oc} / A \cdot 100\% = 6,07\%$

Загружение	m_x	m_y	φ	ФМКЭ	$(1 - \varphi / \text{ФМКЭ})$
	0,5	0,5	729	730	0,211%
		1,0	642	643	0,127%
		3,0	363	364	0,345%
		5,0	227	234	3,187%
	1,0	0,5	560	567	1,268%
		1,0	549	551	0,331%
		3,0	326	329	0,713%
		5,0	218	223	2,290%
	2,0	0,5	379	380	0,269%
		1,0	352	353	0,255%
		3,0	250	259	3,707%
		5,0	190	196	3,483%
	4,0	0,5	217	217	0,226%
		1,0	207	207	0,226%
		3,0	172	174	1,019%
		5,0	142	146	3,100%
	0,5	0,5	718	716	-0,249%
		1,0	632	635	0,554%
		3,0	363	371	2,226%
		5,0	231	237	2,372%
	1,0	0,5	576	579	0,560%
		1,0	536	538	0,503%
		3,0	338	345	2,033%
		5,0	227	232	2,562%
	2,0	0,5	401	405	1,019%
		1,0	386	390	1,027%
		3,0	279	283	1,489%
		5,0	207	211	2,022%
	4,0	0,5	241	241	0,295%
		1,0	241	244	1,318%
		3,0	196	198	1,251%
		5,0	162	165	2,098%

Примечание: значения φ_{ef} и $\varphi_{МКЭ}$ увеличены в 1000 раз.

Анализ результатов, представленных в таблице 2.2, показывает хорошее согласование предложенного обратного численного метода расчёта с результатами, полученными методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Максимальное расхождение результатов составляет 5,37%, что указывает на достоверность полученных результатов.

2.7 Сравнение результатов расчета на прочность неповрежденных элементов стальных конструкций по предлагаемому методу и СП

Метод расчета на прочность элементов по [46] при действии в сечении двух и более усилий, кроме сжатия с изгибом в плоскости большей жесткости N и M_x , содержит существенный недостаток: взаимное влияние усилий на развитие пластических деформаций не учитывается, что приводит к заниженным результатам [17, 19].

На графиках (см. Рисунок 2.10) показаны кривые предельных состояний $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$ двутавровых элементов при $\alpha_f = A_f / A_w = 0,25, \dots, 2,0$. Сплошные линии соответствуют разработанному методу, а штриховые – нормативному [95]. Откуда видно, что последний существенно занижает предельные усилия.

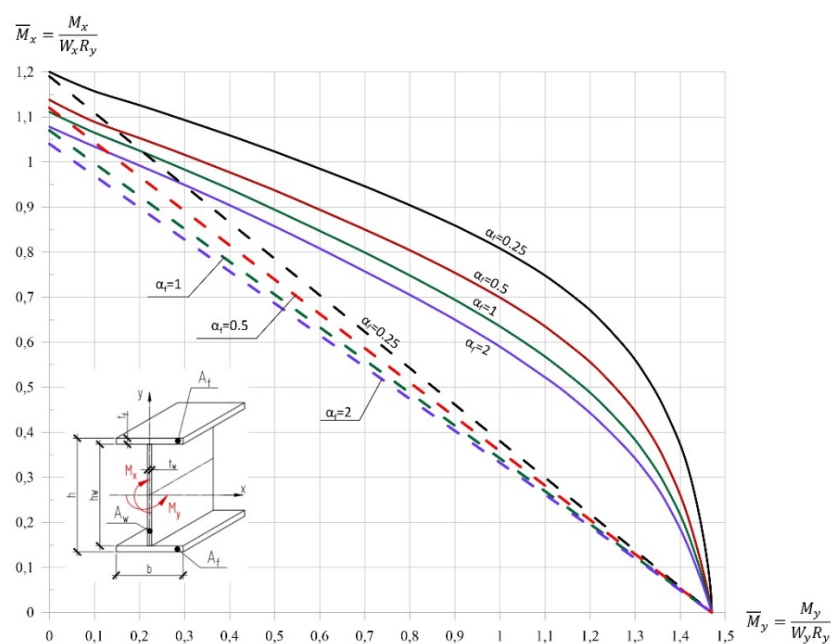


Рисунок 2.10 Кривые предельных состояний при действии $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

Выявленные резервы прочности показаны на Рисунке 2.11, где представлено сопоставление коэффициентов использования. При $\bar{M}_y/\bar{M}_x \geq 0,2$ резервы составляют от 8 % до 32%. Большие из них соответствуют $\alpha_f = 0,25, \dots, 0,5$, а меньшие $\alpha_f = 1, 0, \dots, 2, 0$.

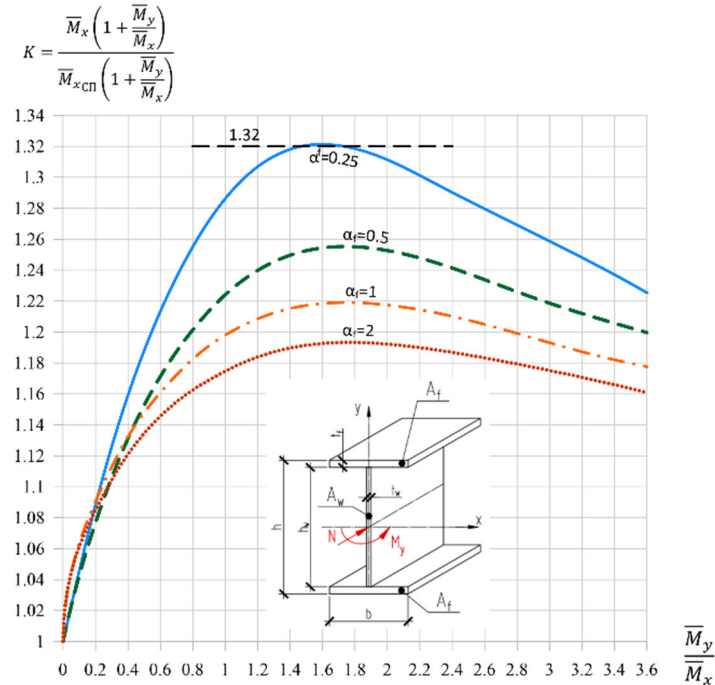


Рисунок 2.11 Резервы прочности при действии $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

При действии $\bar{N}$ совместно с $\bar{M}_y$ так же выявлены резервы прочности (см. Рисунок 2.12 и Рисунок 2.13), которые для двутавровых элементов составляют от 4...11 % при $\bar{M}_y \leq 0,4$ до 29% при $\bar{M}_y > 0,4$.

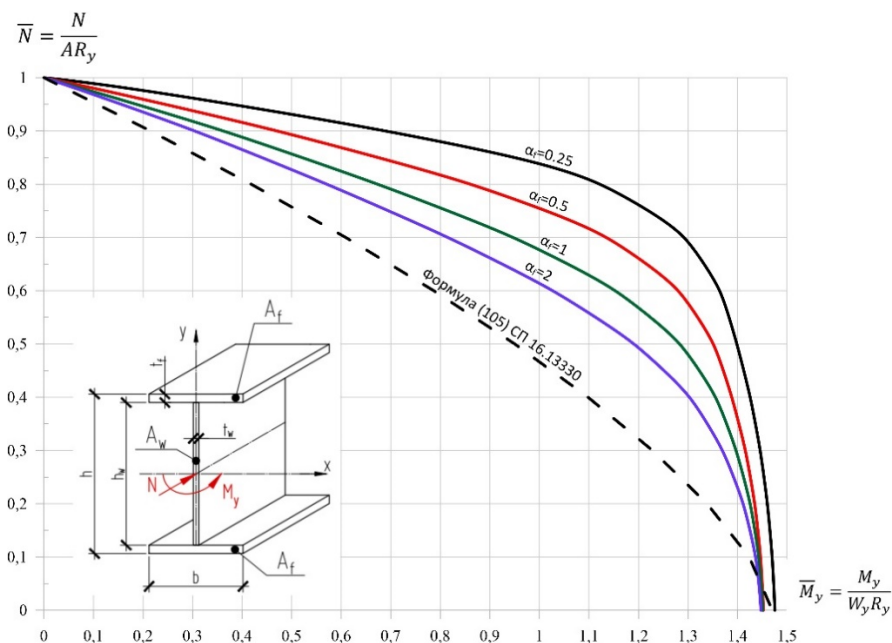


Рисунок 2.12 Кривые предельных состояний при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$

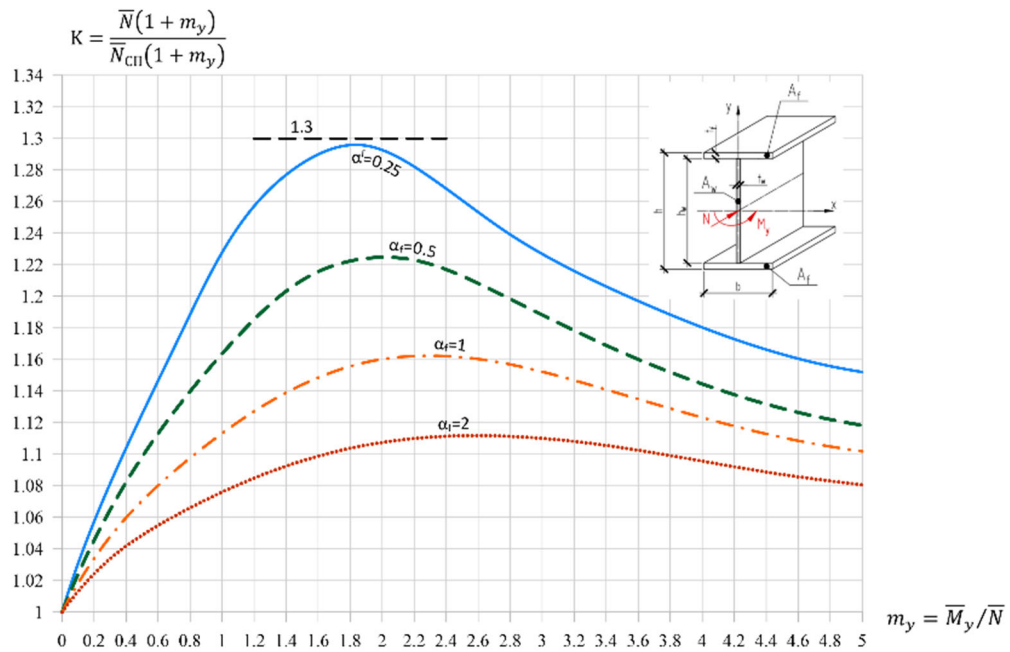


Рисунок 2.13 Резервы прочности при действии $\bar{N}$ и $\bar{M}_y$

На рисунке 2.14 сплошными линиями показаны кривые предельных состояний $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ для двутавровых элементов с $\alpha_f = 0,5$ при различных значениях $\bar{N}$, построенные по результатам настоящего исследования. Там же пунктирными линиями приведены соответствующие данные по [95]. Сопоставляя их, можно констатировать, что СП 16.13330.20173 при трехпараметрическом нагружении значительно больше занижает предельные усилия, чем при двухпараметрических.

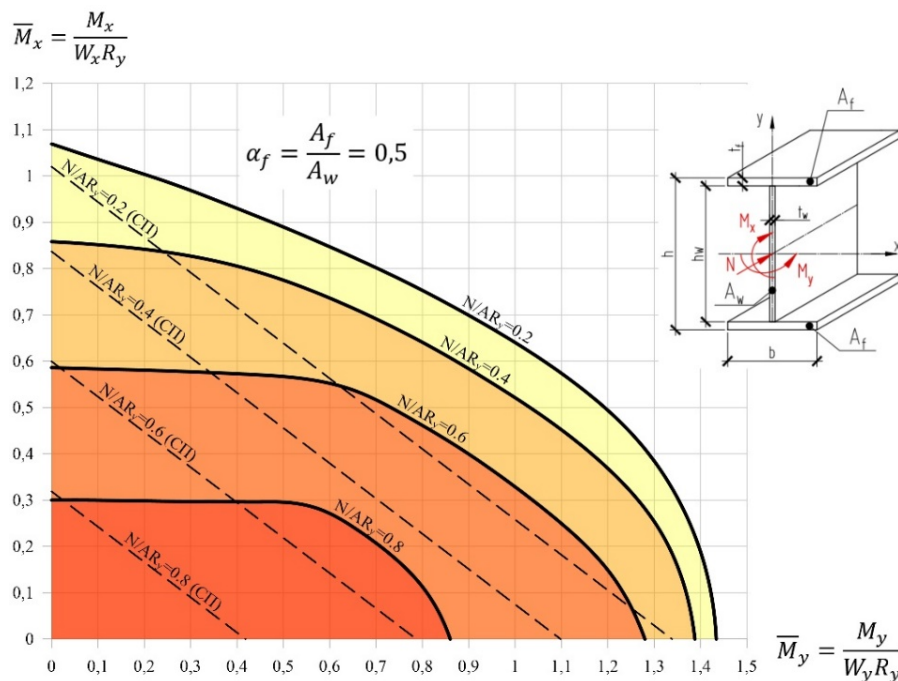


Рисунок 2.14 Кривые предельных состояний при действии $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

Резервы прочности иллюстрируются графиками на Рисунке 2.15. Откуда видно, что при средних значениях $\bar{N}=0,4,...,0,6$ ($m_y/m_x \geq 0,3$) они находятся в пределах 10...45%. Малым значениям $\bar{N} \leq 0,2$ соответствуют снижения этих резервов в 1,5 раза, в большем $\bar{N} \geq 0,8$ – в 2,5 раза. При $0,25 \leq \alpha_f \leq 0,5$ приведенные параметры увеличиваются, а при $0,5 \leq \alpha_f \leq 2$ наоборот – уменьшаются.

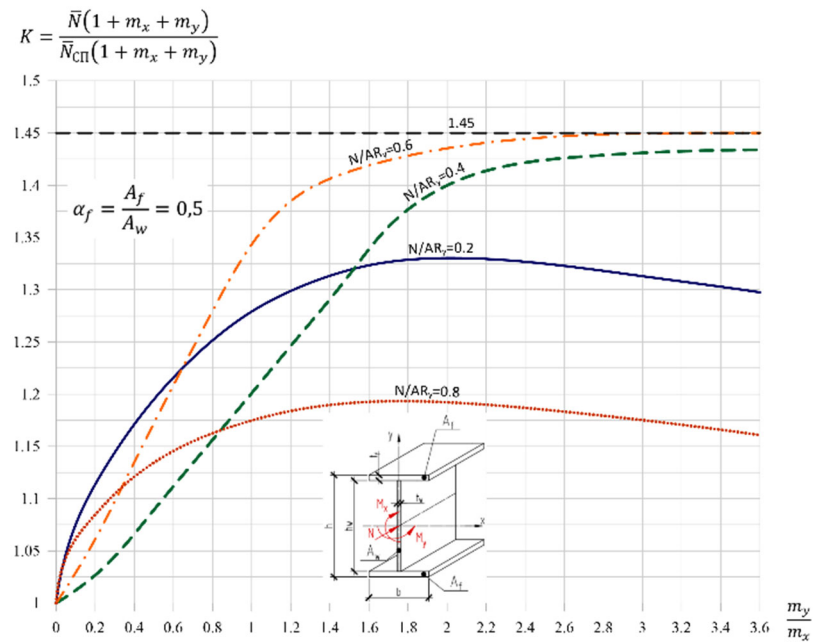


Рисунок 2.15 Резервы прочности при действии $\bar{N}$, $\bar{M}_x$ и $\bar{M}_y$

С целью построения практических рекомендаций по расчету на прочность поврежденных элементов стальных конструкций будет использоваться метод расчета, предложенный в работе [19], учитывающий взаимное влияние усилий на развитие пластических деформаций.

2.8 Практический метод расчета на прочность стержневых элементов стальных конструкций с повреждениями

Для удобства использования практического метода расчета на прочность поврежденных элементов используется метод расчета для неповрежденных элементов, представленный в СП 16.13330.2017 [95], с введением дополнительного догружения фиктивными силами, компенсирующего ослабление сечения, к которому, как было отмечено ранее, сводятся механические и коррозионные повреждения. Значения фиктивных сил могут быть определены с помощью метода

упругих решений по заданному загрузению $N_{ef}, M_{x,ef}$ и $M_{y,ef}$.

2.8.1 Определение фиктивной силы, компенсирующей несимметричное ослабление пояса

Рассматривается двутавровое сечение, нагруженное продольной силой N_{ef} и изгибающими моментами $M_{x,ef}$ и $M_{y,ef}$, имеющее в наиболее нагруженной зоне ослабление пояса площадью $A_{f,0}$ с координатами центра тяжести $x_{f,0}$, $y_{f,0}$ (см. Рисунок 2.16а).

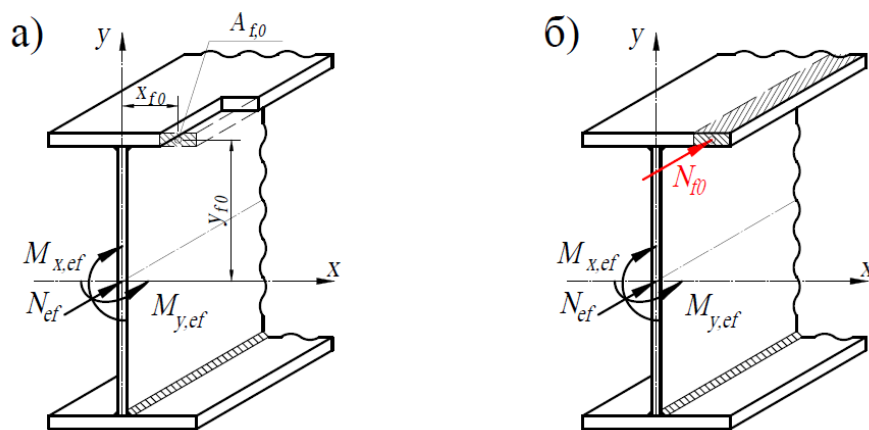


Рисунок 2.16 Схема действующих усилий в элементе с: а) поврежденным сечением; б) полным сечением, догруженным фиктивной силой

Поврежденное сечение заменяется на неповрежденное с компенсирующим догружением фиктивной силой $N_{f,0} = \sigma_{f,0} \cdot A_{f,0}$ (см. Рисунок 2.16б), которая определяется по фиктивному напряжению в центре тяжести ослабления [81]:

$$\sigma_{f,0} = \frac{N_{ef}/A + (M_{x,ef}/I_x) \cdot y_{f,0} + (M_{y,ef}/I_y) \cdot x_{f,0}}{1 - \bar{A}_{f,0} (1 + y_{f,0}^2/I_x^2 + x_{f,0}^2/I_y^2)} \quad (2.13)$$

2.8.2 Определение фиктивных сил, компенсирующих ослабления стенки и полки

Рассматривается двутавровое сечение, нагруженное продольной силой N_{ef} и изгибающими моментами $M_{x,ef}$ и $M_{y,ef}$, имеющее в наиболее нагруженной зоне

ослабление пояса площадью $A_{f,0}$ с координатами центра тяжести $x_{f,0}$, $y_{f,0}$ и стенки - $A_{w,0}$ с $x_{w,0} = 0$, $y_{w,0}$ (см. Рисунок 2.17а).

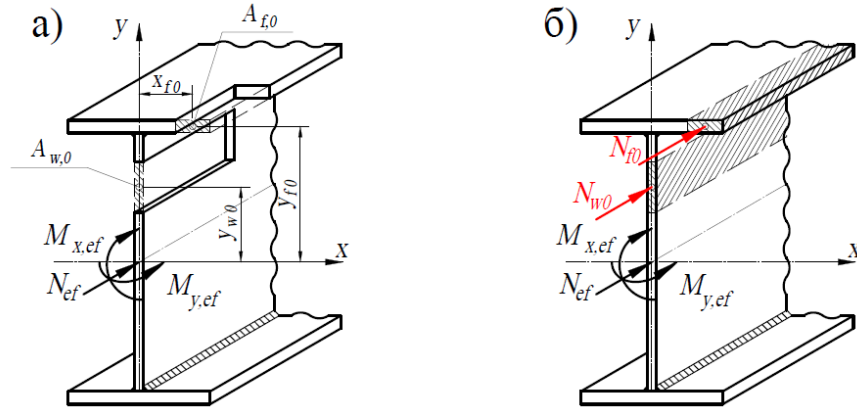


Рисунок 2.17 Схема действующих усилий в элементе с: а) поврежденным сечением; б) полным сечением, догруженным фиктивными силами

Поврежденное сечение заменяется на неповрежденное с компенсирующим догружением фиктивными силами $N_{f,0} = \sigma_{f,0} \cdot A_{f,0}$ и $N_{w,0} = \sigma_{w,0} \cdot A_{w,0}$ (см. Рисунок 2.17б), которые определяются по фиктивным напряжениям в центре тяжести ослаблений [8]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{f,0} &= \frac{\sigma(x_{f,0}, y_{f,0})K_2 + \sigma(0, y_{f,0})\bar{A}_{w,0}K_3}{K_1K_2 - \bar{A}_{f,0}\bar{A}_{w,0}K_3^2} \\ \sigma_{w,0} &= \frac{\sigma(0, y_{w,0})K_1 + \sigma(x_{f,0}, y_{f,0})\bar{A}_{f,0}K_3}{K_1K_2 - \bar{A}_{f,0}\bar{A}_{w,0}K_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

где $K_1 = 1 - \bar{A}_{f,0} \left(1 + \frac{y_{f,0}^2}{I_x^2} + \frac{x_{f,0}^2}{I_y^2} \right)$; $K_2 = 1 - \bar{A}_{w,0} \left(1 + \frac{y_{w,0}^2}{I_x^2} \right)$; $K_3 = 1 + \frac{y_{f,0}y_{w,0}}{I_x^2}$;

$$\bar{A}_{f,0} = A_{f,0}/A; \bar{A}_{w,0} = A_{w,0}/A; \sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{f,0} + \frac{M_{y,ef}}{I_y} x_{f,0};$$

$$\sigma(0, y_{w,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{w,0}.$$

2.8.3 Расчет на прочность поврежденных элементов при общем нагружении

Проверку прочности при упругой работе материала можно выполнить по формулам, представленных в нормах [95], как для неповрежденного элемента:

$$\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} + \frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{W_x R_y \gamma_c} + \frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{W_y R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (2.15)$$

где $N^{loc} = N_{f,0} + N_{w,0}$, $M_x^{loc} = N_{f,0} \cdot y_{f,0} + N_{w,0} \cdot y_{w,0}$, $M_y^{loc} = N_{f,0} \cdot x_{f,0}$ – дополнительные фиктивные сила и моменты, компенсирующие повреждения.

Проверка прочности с учетом развития пластических деформаций выполняется по формулам, представленных в работе [19], как для неповрежденного элемента:

$$\left(\frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{c_{xz} W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{c_{yz} W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (2.16)$$

$$\text{где } c_{xz} = c_x \left(1 - \left(\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} \right)^{n_x} \right); c_{yz} = c_y \left(1 - \left(\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} \right)^{n_y} \right);$$

$$n_x = 1 + \frac{1}{1 + 2,3\alpha_f}; n_y = 1,75 + \frac{1}{\alpha_f} \leq 10; c_x = 1,47 + 6\alpha_f / (1 + 6\alpha_f);$$

$$c_y = 1,47; \alpha_f = A_f / A_w; p = \frac{2,3}{\sqrt[5]{\alpha_f}} - \frac{(N_{ef} + N^{loc})(3 - 0,4\alpha_f)}{AR_y \gamma_c} \geq 1;$$

$$q = 1 + \left(\frac{(N_{ef} + N^{loc})(2,45 - 0,6 \ln \alpha_f)}{AR_y \gamma_c} \right)^3 \geq 1.$$

2.8.4 Расчет на прочность элементов с несимметричным повреждением при упругопластической работе материала

Проверка прочности при действии продольной силы:

$$\left(\frac{M_x^{loc}}{c_{xz} W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_y^{loc}}{c_{yz} W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (2.17)$$

Проверка прочности при действии продольной силы с изгибом в плоскости большей жесткости:

$$\left(\frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{c_{xz} W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_y^{loc}}{c_{yz} W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (2.18)$$

Проверка прочности при действии продольной силы с изгибом в плоскости меньшей жесткости:

$$\left(\frac{M_x^{loc}}{c_{xz} W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{c_{yz} W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (2.19)$$

Проверка прочности при косом изгибе с поперечной силой Q_x :

$$\left(\frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{c_x \beta W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{c_y W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (2.20)$$

где β – коэффициент, учитывающий влияние поперечной силы, $p = 2, 3 / \sqrt[5]{\alpha_f} \geq 1$ и $q = 1$ – коэффициенты учета совместного действия изгибающих моментов при развитии пластических деформаций

2.8.5 Расчета на прочность элементов с симметричным повреждением при упругопластической работе материала

Проверка прочности при действии продольной силы:

$$\left(\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} \right)^{n_{x(y)}} + \frac{M_{x(y)}^{loc}}{c_{x(y)} W_{x(y)} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (2.21)$$

Проверка прочности при действии продольной силы с изгибом в одной из плоскостей:

$$\left(\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} \right)^{n_{x(y)}} + \frac{M_{x(y),ef} + M_{x(y)}^{loc}}{c_{x(y)} W_{x(y)} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (2.22)$$

Проверка прочности при косом изгибе с поперечной силой Q_x :

$$\left(\frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{c_x \beta W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{c_y W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (2.23)$$

где $p = 2, 3 / \sqrt[5]{\alpha_f} \geq 1$ и $q = 1$ – коэффициенты учета совместного действия изгибающих моментов при развитии пластических деформаций.

2.9 Выводы по главе

1. Параметры механических (погнутости, вырывы, истирания) и коррозионных, вызывающих потерю местной устойчивости, повреждений приведены к эквивалентному ослаблению сечения в виде вырезов.

2. Приведена адаптация «обратного» численного метода расчета прочности на элементы с повреждениями.

3. Установлена зависимость величины и места расположения повреждения на снижение прочности. Показана необходимость проверки прочности по специальной комбинации усилий, составленной применительно к месту расположения повреждения.

4. Одно и то же значение параметра повреждения может как приводить к снижению прочности на 13-22,3% (в 2,2-3,7 раза больше площади повреждения), так и оказывать незначительное влияние на прочность элемента. Все зависит от места его расположения относительно действующих усилий.

5. Сопоставление значений относительной продольной силы, вычисленных предложенным методом расчёта на прочность и методом конечных элементов для стальных стержней с ослаблением сечения в виде выреза, выявило удовлетворительную степень согласованности результатов. Максимальное расхождение между ними не превысило 5,37%, что свидетельствует о достоверности разработанного расчётного метода.

6. Разработан практический метод расчета прочности поврежденных элементов при общем загрузении, гармонизированный с действующими нормативными документами.

ГЛАВА 3. УСТОЙЧИВОСТЬ СТРЕЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ИМЕЮЩИХ ПОВРЕЖДЕНИЯ И ОБЩИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ ОСИ

В главе рассматривается исследование устойчивости выделенных из эксплуатируемых стальных конструкций по расчетной длине элементов, имеющих пространственное искривление оси и различные типы повреждений. Последние, как показано во второй главе, сводятся к эквивалентному ослаблению сечения в виде выреза. Загружение рассматривается продольной силой с равными двухосными концевыми эксцентриситетами. Решение задачи проводится обратным численно-аналитическим методом, в котором предложена упругая модель неповрежденного элемента с эквивалентным догружением фиктивными силами, компенсирующими физическую нелинейность и обобщённое повреждение в средней части стержня. При этом начальное пространственное искривление оси элемента приводится к эквивалентному двухосному эксцентриситету продольной силы. В результате проведенного исследования установлено влияние места расположения повреждения в сечении относительно вектора действующих усилий на устойчивость по изгибной и изгибно-крутильным форме. Определено влияние относительной величины общего коррозионного повреждения на устойчивость стержня. Приводятся практические рекомендации по расчету на устойчивость элементов с дефектами и повреждениями.

3.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения

Все допущения, сформулированные в главе 2 при решении задач прочности повреждённых стержневых элементов и касающиеся определения напряжённо-деформированных и предельных состояний поперечного сечения, распространяются на задачи, рассматриваемые в данном разделе. Наряду с этим принимается, что крутильная жёсткость остается постоянной как в упругой, так и в упругопластической стадиях работы материала, поскольку касательные напряжения в рассматриваемых условиях нагружения имеют незначительную величину и их влиянием на процесс развития пластических деформаций можно пренебречь.

3.2 Расчетная схема поврежденного элемента

Рассматривается выделенный из конструкции по расчётной длине $l_{ef,x}$ или $l_{ef,y}$ (в зависимости от решаемой задачи устойчивости) поврежденный двутавровый элемент, имеющий в наиболее нагруженной его части обобщенное (характеризующее механическое и коррозионное) повреждение в виде выреза. На Рисунок 3.1а $l_{ef,x}$ и $l_{ef,y}$ показаны в совмещённом виде общей длиной l . Согласно методу расчёта [95], стержень рассматривается шарнирно закрепленным на торцах, концевые сечения которого свободно деформируются при отсутствии угла закручивания опорных узлов. Загружение рассматривается действием продольной силы N^0 с равными концевыми эксцентриситетами в плоскости большей жесткости $e_{y*}^0 = e_y^0$ и из этой плоскости $e_{x*}^0 = e_x^0$.

Деформационная задача решается на упругой модели стержня с постоянной жёсткостью (см. Рисунок 3.1 а), нагруженной продольной силой N^* с двухосным эксцентриситетом e_y^* и e_x^* .

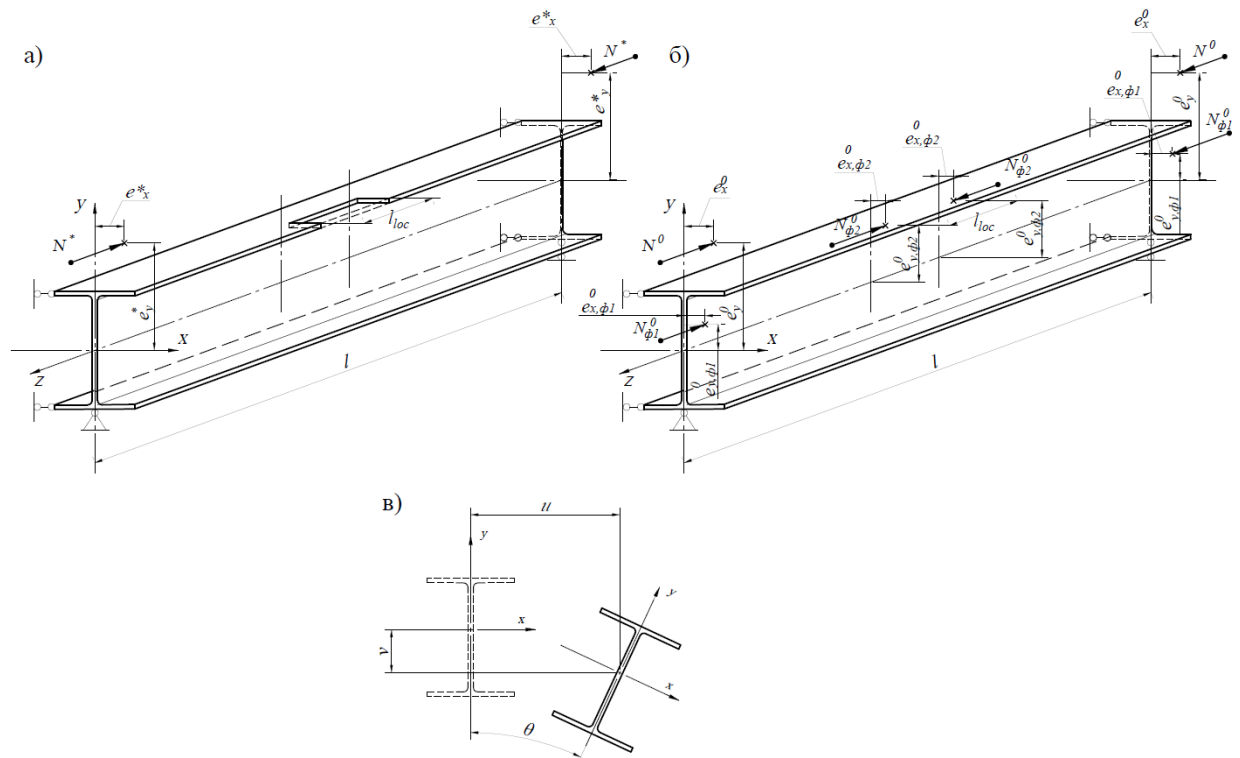


Рисунок 3.1 Расчётная схема стержня: а) – упругопластического с локальным повреждением (вырезом); б) – неповреждённого упругого догруженного фиктивными силами; в) – схема деформирования.

Физическая нелинейность учитывается введением в расчетную упругую модель (см. Рисунок 3.1 а) эквивалентной фиктивной силы $N_{\phi 1}^0$, приложенной на торцах с эксцентриситетом $e_{y,\phi 1}^0$ и $e_{x,\phi 1}^0$ (см. Рисунок 3.1б), которая будет определяться с помощью алгоритма «сечение» в наиболее напряженной средней части неповрежденного элемента.

Влияние локального (обобщенного) повреждения с вырезом длиной l_{loc} и шириной b_{loc} (см. Рисунок 3.1а) компенсируется догрузением локальной фиктивной силой $N_{\phi 2}^0$ с двухосным эксцентриситетом $e_{y,\phi 2}^0$ и $e_{x,\phi 2}^0$ (см. Рисунок 3.1б).

Таким образом, задачу устойчивости сжато-изогнутого в двух плоскостях упругопластического стержня с локальным повреждением (вырезом) сводим к задаче неповреждённого упругого, с дополнительным догрузением фиктивными силами с двухосными эксцентриситетами: $N_{\phi 1}$, компенсирующей развитие пластических деформаций; $N_{\phi 2}$, учитывающей влияние локального повреждения.

Ослабление, вызванное общим коррозионным повреждением, распространённым по всей длине стержня, может быть компенсировано фиктивными силами $N_{\phi 1}$ и $N_{\phi 2}$, действующими по торцам элемента с двухосными эксцентриситетами. При этом последняя учитывает общее ослабление сечения в сочетании с потерей местной устойчивости.

3.3 Аналитический метод деформационного расчета упругого стержня с дополнительным действием фиктивных сил

Для исследования деформированных состояний воспользуемся технической теорией В.З. Власова [31] и деформационной теорией упругих стержней Л.Н. Воробьева [32], Б.М. Броуде [29], Г.В. Воронцова [33], обобщенной Е.А. Бейлиным [73]. Пренебрегая малыми разгружающим влиянием изгибно-крутильных перемещений u и θ на перемещения в плоскости большей жёсткости ($I_x > I_y$) v (см. Рисунок 3.1в) система дифференциальных уравнений равновесия для принятой расчетной схемы стержня принимает вид [18, 93]:

$$E I_x v'' + N^0 v = -N^0 e_{y*,v}^0 - N_{\phi 1}^0 e_{y,\phi 1}^0 - N_{\phi 2}^0 e_{y,\phi 2}^0 \Big|_{l_{loc}} \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} E I_y u'' + N^0 \left[u + \left(e_{y*,u}^0 - a_y \right) \theta \right] v &= -N^0 e_{x*}^0 - N_{\phi 1}^0 e_{x,\phi 1}^0 - N_{\phi 2}^0 e_{x,\phi 2}^0 \Big|_{l_{loc}} \\ E I_w \theta^{IV} + G I_k \theta'' + N^0 \left(e_{y*,u}^0 - a_y \right) u'' + N^0 \left(i_A^2 + 2\beta_y \cdot e_{y*,u}^0 \right) \theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

где I_x, I_y, I_w – осевые и секторальный моменты инерции сечения; I_k – момент инерции чистого кручения; $i_A^2 = i_p^2 + a_y^2$; i_p^2 – полярный радиус инерции; a_y – координата центра изгиба; $\beta_y = (2I_y)^{-1} (x^2 + y^2) y dA - a_y$.

Как указывается в работе [18] фиктивные силы $N_{\phi 1}^0, N_{\phi 2}^0$ и моменты от их действия $M_{x(y),\phi 1}^0 = N_{\phi 1}^0 e_{y(x),\phi 1}^0$, $M_{x(y),\phi 2}^0 = N_{\phi 2}^0 e_{y(x),\phi 2}^0$ по терминологии А.А. Ржаницина [87] относятся к активным, при действии которых постановка бифуркационной задачи устойчивости невозможна (см. правую часть уравнений (3.1) и (3.2)), что позволяет определять перемещения недеформационным расчетом.

Уравнение (3.1) соответствует изгибной форме потери устойчивости, а система (3.2) – изгибно-крутильной. Следуя [95] в первом случае $e_{y,v}^0$ определяется по максимальному моменту, а во втором $e_{y,u}^0$ – по наибольшему моменту в средней трети длины стержня.

Общее решение уравнения (3.1) и системы (3.2) представим в виде соответствующих им линейных комбинаций частных решений задач недеформационного расчёта и бифуркационных задач устойчивости [6, 18].

$$v = (V_H + V_{\phi 1}) \cdot 4 \cdot (\bar{z} - \bar{z}^2) + V_D \sin \pi \bar{z} + V_{\phi 2} 4 \left\{ \bar{z} \frac{l_{loc}}{l} - \left[\bar{z} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{l_{loc}}{l} \right) \right]^2 \right\} \Big|_{\bar{z}=0,5-l_{loc}/2l}^{\bar{z}=1/2} \quad (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= (U_H + U_{\phi 1}) \cdot 4 \cdot (\bar{z} - \bar{z}^2) + U_D \sin \pi \bar{z} + U_{\phi 2} 4 \left\{ \bar{z} \frac{l_{loc}}{l} - \left[\bar{z} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{l_{loc}}{l} \right) \right]^2 \right\} \Big|_{\bar{z}=0,5-l_{loc}/2l}^{\bar{z}=1/2} \\ \theta &= \theta_D \sin \pi \bar{z} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где $V_H = \frac{N^0 l^2}{8EI_x} e_{x*,v}^0$, $V_{\phi 1} = \frac{N_{\phi 1}^0 l^2}{8EI_x} e_{y,\phi 1}^0$, $V_{\phi 2} = \frac{N_{\phi 2}^0 l^2}{8EI_x} e_{y,\phi 2}^0$, $U_H = \frac{N^0 l^2}{8EI_y} e_x^0$, $U_{\phi 1} = \frac{N_{\phi 1}^0 l^2}{8EI_y} e_{x,\phi 1}^0$,

$U_{\phi 2} = \frac{N_{\phi 2}^0 l^2}{8EI_y} e_{x,\phi 2}^0$ – амплитуды прогиба по недеформированной схеме; V_D, U_D, θ_D –

неизвестные константы, имеющие размерность соответствующих перемещений с точностью, до которых решаются бифуркационные задачи устойчивости; $\bar{z} = z/l$ – относительная координата. Первые и третьи слагаемые для v и u в (3.3) и (3.4) представляют собой результаты расчета по не деформированной схеме, а $v_d = V_d \sin \pi \bar{z}$, $u_d = U_d \sin \pi \bar{z}$, $\theta = \theta_d \sin \pi \bar{z}$ являются функциями потери устойчивости.

Для определения V_d и U_d , θ_d используем уравнение (3.1) и систему (3.2), в которые подставим общее соответствующие им уравнения (3.3) и (3.4), в результате чего получим:

$$L_v = E I_x v_d'' + N v = 0 \quad (3.5)$$

$$\left. \begin{aligned} L_u &= E I_y u_d'' + N^0 \left[u + \theta_d (e_{y,u}^0 - a_y) \right] = 0 \\ L_\theta &= E I_w \theta_d^{IV} + G I_k \theta_d'' + N^0 \left[(e_{y,u}^0 - a_y) u'' + \theta_d'' (i_A^2 + 2\beta_y \cdot e_{y,u}^0) \right] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Применив к (3.5) и (3.6) алгоритм метода Бубнова-Галёркина придём к алгебраическому уравнению относительно неизвестной константы V_d (первое уравнение) и систему двух аналогичных последних уравнений относительно U_d и θ_d , которые приведем к безразмерным, соответствующим [46], параметрам: $\varphi = N^0 / R_y A$, $\varphi_{\phi 1} = N_{\phi 1}^0 / R_y A$, $\varphi_{\phi 2} = N_{\phi 2}^0 / R_y A$ – коэффициенты продольных сил; $m_{x,v}^0 = e_{y*,v}^0 / \rho_x$, $m_{x,u}^0 = e_{y*,u}^0 / \rho_x$, $m_y^0 = (e_x^0 + e_u^0) / \rho_y$, $m_{x,\phi 1}^0 = e_{y,\phi 1}^0 / \rho_x$, $m_{y,\phi 1}^0 = e_{x,\phi 1}^0 / \rho_y$, $m_{x,\phi 2}^0 = e_{y,\phi 2}^0 / \rho_x$, $m_{y,\phi 2}^0 = e_{x,\phi 2}^0 / \rho_y$ – относительные эксцентриситеты, $m_{ax} = a_y / \rho_x$ – относительный центр изгиба; $\rho_x = W_{x,c} / A$, $\rho_y = W_{y,c} / A$ – ядровые расстояния неповрежденного сечения.

$$\int_0^1 L_v \sin \pi \bar{z} d\bar{z} = 0 ; \int_0^1 L_u \sin \pi \bar{z} d\bar{z} = 0 ; \int_0^1 L_\theta \sin \pi \bar{z} d\bar{z} = 0 , \quad (3.7)$$

Выполнив процедуру (3.7) относительно безразмерных деформационных перемещений $m_{x,d} = V_d / \rho_x$, $m_{y,d} = U_d / \rho_y$, θ_d представим напряжённое состояние $(\bar{\sigma} = \sigma / R_y)$ в наиболее нагруженном сечении $(\bar{z} = 0,5)$ при деформировании стержня [15]:

- по изгибной форме

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \varphi_{ex}^* + \varphi_{ex}^{dam} \left[\left(m_{x,v}^0 + m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1}}{\varphi_{ex}^{dam}} \right) K_{d,x1} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 2}}{\varphi_{ex}^{dam}} K_{d,x2} \right] \bar{y} + \\ & + \varphi_{ex}^{dam} \left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1}}{\varphi_{ex}^{dam}} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 2}}{\varphi_{ex}^{dam}} \right) \bar{x}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } \varphi_{ex}^* = & \varphi_{ex}^{dam} + \varphi_{ex,\phi 1} + \varphi_{ex,\phi 2}; \quad K_{d,x1} = 1 + \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left(1 + 0,032 \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right); \\ K_{d,x2} = & 1 + \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left[\left(\frac{l_{loc}}{l} \right)^2 \left(\frac{2l}{l_{loc}} - 1 \right) \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right) + 1,032 \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \sin \frac{\pi l_{loc}}{2l} \right]; \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

$\bar{x} = x/x_*$, $\bar{y} = y/y_*$, x_* и y_* – координаты наиболее напряжённого волокна.

- по изгибно-крутильной форме

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \varphi_{yc}^* + \varphi_{yc}^{dam} \left(m_{x,u}^0 + m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 2}}{\varphi_{yc}^{dam}} \right) \bar{y} + \\ & + \varphi_{yc}^{dam} \left[\left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}} \right) K_{d,y1} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 2}}{\varphi_{yc}^{dam}} K_{d,y2} \right] \bar{x}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } \varphi_{yc}^* = & \varphi_{yc}^{dam} + \varphi_{yc,\phi 1} + \varphi_{yc,\phi 2}; \\ K_{d,y1} = & 1 + \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left[1 + 0,032 \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} + \theta_d \frac{8}{\pi^2} \frac{\rho_x}{\rho_y} \frac{(m_x^0 - m_{ax})}{\left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}} \right)} \right]; \\ K_{d,y2} = & 1 + \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left[\left(\frac{l_{loc}}{l} \right)^2 \left(\frac{2l}{l_{loc}} - 1 \right) \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \right) + \right. \\ & \left. + 1,032 \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \sin \frac{\pi l_{loc}}{2l} + \theta_d \frac{8}{\pi^2} \frac{\rho_x}{\rho_y} \frac{(m_x^0 - m_{ax})}{\left(m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{\phi 2}}{\varphi_{yc}^{dam}} \right)} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

- по пространственной форме

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \varphi_{exy}^* + \varphi_{exy}^{dam} \left[\left(m_x^0 + m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 1}}{\varphi_{exy}^{dam}} \right) K_{d,x1} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 2}}{\varphi_{exy}^{dam}} K_{d,x2} \right] \bar{y} + \\ & + \varphi_{exy}^{dam} \left[\left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 1}}{\varphi_{exy}^{dam}} \right) K_{d,y1} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 2}}{\varphi_{exy}^{dam}} K_{d,y2} \right] \bar{x}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

Угол закручивания среднего сечения θ_d в (3.11) и (3.12) при совместном действии N^0 , $N_{\phi 1}^0$, и $N_{\phi 2}^0$ определяется:

$$\theta_d = 1,032 \frac{8}{\pi^2} \frac{\rho_y}{\rho_x} K_1 K_4 (K_3 - K_1 - K_2)^{-1} \quad (3.13)$$

$$\text{где } K_1 = \left(m_x^0 - m_{ax} \right)^2 \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \right); \quad K_2 = \frac{i_A^2 + 2\beta_y m_x^0 \rho_x}{\rho_x^2} \frac{\pi}{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^2};$$

$$K_3 = \left(1 + \frac{k^2 l^2}{\pi^2} \right) \frac{\pi^4}{\varphi_{yc}^{dam^2} \bar{\lambda}_y^4} \frac{I_w}{I_y \rho_x^2}; \quad k = \sqrt{GI_k / EI_w} \quad - \text{ изгибно-крутильная характеристика}$$

$$\text{сечения; } K_4 = \left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 2}}{\varphi_{yc}^{dam}} \sin \frac{\pi l_{loc}}{2l} \right) \left(m_x^0 - m_{ax} \right)^{-1}.$$

Деформационные коэффициенты $K_{d,x1}$ и $K_{d,x2}$ в (3.9) и (3.12) учитывают влияние перемещений v в плоскости uoz на изгибающий момент M_x , а $K_{d,y1}$ и $K_{d,y2}$ в (3.11) и (3.12) изгибно-крутильных u и θ перемещений на момент M_y .

Напряжённое состояние в наиболее нагруженном сечении ($\bar{z} = 0,5$) при общем коррозионном повреждении, распространённом по всей длине деформируемого стержня:

- по изгибной форме

$$\bar{\sigma}(\bar{y}) = \varphi_{ex}^* + \varphi_{ex}^{cor} \left[\left(m_{x,v}^0 + m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1}}{\varphi_{ex}^{cor}} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 2}}{\varphi_{ex}^{cor}} \right) K_{d,x1} \right] \bar{y}, \quad (3.14)$$

$$\text{где } \varphi_{ex}^* = \varphi_{ex}^{cor} + \varphi_{ex,\phi 1} + \varphi_{ex,\phi 2}; \quad K_{d,x1} = 1 + \frac{\varphi_{ex}^{cor} \bar{\lambda}_x^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{cor} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left(1 + 0,032 \frac{\varphi_{ex}^{cor} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right). \quad (3.15)$$

- по изгибно-крутильной форме

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \varphi_{yc}^* + \varphi_{yc}^{cor} \left[m_{x,u}^0 + m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{cor}} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 2}}{\varphi_{yc}^{cor}} \right] \bar{y} + \\ & + \varphi_{yc}^{cor} \left[\left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{cor}} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 2}}{\varphi_{yc}^{cor}} \right) K_{d,y1} \right] \bar{x}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где $\varphi_{yc}^* = \varphi_{yc}^{cor} + \varphi_{yc,\phi 1} + \varphi_{yc,\phi 2}$;

$$K_{d,y1} = 1 + \frac{\varphi_{yc}^{cor} \bar{\lambda}_y^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{cor} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \right)^{-1} \left[1 + 0,032 \frac{\varphi_{yc}^{cor} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} + \theta_d \frac{8}{\pi^2} \frac{\rho_x}{\rho_y} \frac{(m_x^0 - m_{ax})}{\left(m_y^0 + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 2}}{\varphi_{yc}^{cor}} \right)} \right]. \quad (3.17)$$

- по пространственной форме

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \varphi_{exy}^* + \varphi_{exy}^{cor} \left[\left(m_x^0 + m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 1}}{\varphi_{exy}^{cor}} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 2}}{\varphi_{exy}^{cor}} \right) K_{d,x1} \right] \bar{y} + \\ & + \varphi_{exy}^{cor} \left[\left(m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 1}}{\varphi_{exy}^{cor}} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{exy,\phi 2}}{\varphi_{exy}^{cor}} \right) K_{d,y1} \right] \bar{x}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

Таким образом, общее решение деформационной задачи по изгибной (3.8), изгибно-крутильной (3.10) и пространственной (3.12) формам упругого стержня при действии фактической N^0 и фиктивных сил, компенсирующих развитие пластических деформаций $N_{\phi 1}^0$ и локального повреждения $N_{\phi 2}^0$, получено в аналитическом виде, которое в сочетании с алгоритмом «сечение» позволяет вести деформационный расчёт в обратной последовательности [9].

3.4 Обратный численно-аналитический метод расчета упругопластического поврежденного элемента

Обратное решение деформационных задач по изгибной и изгибно-крутильной формам, как отмечалось в работах [15, 116], проведем по заданному i -ому деформированному состоянию в наиболее нагруженном сечении ($\bar{z}=0,5$) с максимальной относительной деформацией $\bar{\epsilon}_{\max,i}$, находящейся в пределах от решения задач прочности $\bar{\epsilon}_{\max,i}=4$ до потери устойчивости в упругой стадии $0,8 < \bar{\epsilon}_{\max,i} < 4$, которая принимается в зависимости от гибкости элемента. Малым значениям гибкости задают большие значение $\bar{\epsilon}_{\max,i}$, а большим — меньшие.

i -е деформированное состояние задается действием упругой продольной силы N_i^* с двухосным эксцентриситетом $e_{y,i}^*$ и $e_{x,i}^*$ (см. Рисунок 3.1 а), что соответствует модели неограниченно упругого материала. Тогда в безразмерных параметрах напряженное и деформированное состояние можно представить в единой форме:

$$\bar{\sigma}_i^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varepsilon_i^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_i^* \left(1 + m_{x,i}^* \bar{y} + m_{y,i}^* \bar{x} \right) \quad (3.19)$$

где $\varphi_i^* = \bar{\varepsilon}_{\max,i} \left(1 + m_{x,i}^* + m_{y,i}^* \right)^{-1}$; $m_{x,i}^* = M_{x,i}^* / N_i^* \rho_x$; $m_{y,i}^* = M_{y,i}^* / N_i^* \rho_y$; $\bar{x} = x/x_*$; $\bar{y} = y/y_*$.

Используя (3.19) и диаграмму $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ с помощью обратного численного метода расчета прочности, изложенного во второй главе диссертации определяем величину:

- фактически действующей силы $\varphi^{dam} = N^0 / A \cdot R_y$ с относительными эксцентриситетами m_x и m_y , учитывающей физическую нелинейность и влияние локального повреждения

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{dam} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \right); \\ m_x &= \frac{\varphi^*}{\varphi^{dam}} \left(-\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,ef} - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy} \right); \\ m_y &= \frac{\varphi^*}{\varphi^{dam}} \left(-\bar{S}_y - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,ef} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

- фиктивной силы $\varphi_{\phi 1} = N_{\phi 1}^0 / A \cdot R_y$ с $m_{x,\phi 1}^0$ и $m_{y,\phi 1}^0$, характеризующую влияние только физической нелинейности

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\phi 1} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,pl} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_{y,pl} \right); \\ m_{x,\phi 1}^0 &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{\phi 1}} \left(\bar{S}_{x,pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,pl} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,pl} \right); \\ m_{y,\phi 1}^0 &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{\phi 1}} \left(\bar{S}_{y,pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,pl} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,pl} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

- локальной фиктивной силы $\varphi_{\phi 2} = N_{\phi 2}^0 / A \cdot R_y$ с $m_{x,\phi 2}^0$ и $m_{y,\phi 2}^0$, определяющей влияние только краевого выреза при упругой работе материала

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\phi 2} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{loc} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,loc} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_{y,loc} \right); \\ m_{x,\phi 2}^0 &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{\phi 2}} \left(\bar{S}_{x,loc} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,loc} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,loc} \right); \\ m_{y,\phi 2}^0 &= \frac{\varphi^*}{\varphi_{\phi 2}} \left(\bar{S}_{y,loc} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,loc} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,loc} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Как отмечалось ранее, ослабление, вызванное общим коррозионным повреждением, распространённым по всей длине стержня, может быть компенсировано фиктивными силами $N_{\phi 1}$ и $N_{\phi 2}$, действующими по торцам элемента с двухосными эксцентриситетами.

Таким образом, по заданному деформированному состоянию в наиболее нагруженном неповрежденном сечении ($\bar{z}=0,5$) посредством действия «упругих» усилий N_i^* , $M_{x,i}^*$, $M_{y,i}^*$, при которых достигается $\bar{\epsilon}_{\max,i}$, можно получить параметры действующей и фиктивных сил с соответствующими эксцентриситетами при деформировании стержня по формам:

- изгибной: φ_{ex} с $m_y^0 = m_y$ по (3.20), $\varphi_{ex,\phi 1}$ с $m_{x,\phi 1}^0$ и $m_{y,\phi 1}^0$ по (3.21), $\varphi_{ex,\phi 2}$ с $m_{x,\phi 2}^0$, $m_{y,\phi 2}^0$ по (3.22)
- изгибно-крутильной: φ_{yc} с $m_{x,u}^0 = m_x$ по (3.20), $\varphi_{yc,\phi 1}$ с $m_{x,\phi 1}^0$ и $m_{y,\phi 1}^0$ по (3.21), $\varphi_{yc,\phi 2}$ с $m_{x,\phi 2}^0$, $m_{y,\phi 2}^0$ по (3.22)
- пространственной: φ_{exy} по (3.20), $\varphi_{yc,\phi 1}$ с $m_{x,\phi 1}^0$ и $m_{y,\phi 1}^0$ по (3.21), $\varphi_{yc,\phi 2}$ с $m_{x,\phi 2}^0$, $m_{y,\phi 2}^0$ по (3.22)

Неизвестными остаются лишь концевые относительные эксцентриситеты фактически приложенной силы N^0 при изгибной $m_{x,v}^0$, изгибно-крутильной m_y^0 , а также пространственной m_x^0 и m_y^0 формам деформирования.

3.4.1 Определение концевых эксцентриситетов продольной силы при общем коррозионном повреждении

При рассмотрении изгибной формы деформирования элемента, имеющего общее коррозионное повреждение, концевой относительный эксцентриситет m_x^0 определяется из сопоставления (3.14) и (3.19), когда $\bar{y} = 1; \bar{x} = 0$:

$$m_x^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} - \varphi_{ex}^*}{\varphi_{ex}^{cor} K_{d,x1}} - m_{x,\phi1}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi1}}{\varphi_{ex}^{cor}} - m_{x,\phi2}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi2}}{\varphi_{ex}^{cor}} \quad (3.23)$$

При рассмотрении изгибно-крутильной формы — m_y^0 определяется из сопоставления (3.16) и (3.19), когда $\bar{x} = \bar{y} = 1$:

$$m_y^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} - (\varphi_{yc}^* + m_{x,u}^0 \varphi_{yc}^{cor} + m_{x,\phi1}^0 \varphi_{yc,\phi1} + m_{x,\phi2}^0 \varphi_{yc,\phi2})}{\varphi_{yc}^{cor} K_{d,y1}} - m_{y,\phi1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi1}}{\varphi_{yc}^{cor}} - m_{y,\phi2}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi2}}{\varphi_{yc}^{cor}} \quad (3.24)$$

Концевые относительные эксцентриситеты при пространственной форме деформирования элемента, имеющего общее коррозионное повреждение определяются при сопоставлении (3.18) и (3.19), когда:

- $\bar{x} = 1, \bar{y} = 0$

$$m_y^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} (1 + m_y^*)}{(1 + m_x^* + m_y^*) \varphi_{exy}^{cor} K_{d,y1}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi1}}{\varphi_{exy}^{cor}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,y1}} + m_{y,\phi1}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,y1}} + \frac{\varphi_{exy,\phi2}}{\varphi_{exy}^{cor}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,y1}} + m_{y,\phi2}^0 \right) \right] \quad (3.25)$$

- $\bar{x} = 0, \bar{y} = 1$

$$m_x^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} (1 + m_y^*)}{(1 + m_x^* + m_y^*) \varphi_{exy}^{cor} K_{d,x1}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi1}}{\varphi_{exy}^{cor}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,x1}} + m_{x,\phi1}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,x1}} + \frac{\varphi_{exy,\phi2}}{\varphi_{exy}^{cor}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,x1}} + m_{x,\phi2}^0 \right) \right] \quad (3.26)$$

3.4.2 Определение концевых эксцентриситетов при локальном повреждении

При рассмотрении изгибной формы деформирования элемента, имеющего обобщенное локальное повреждение, концевой относительный эксцентриситет m_x^0 определяется из сопоставления (3.8) и (3.19), когда $\bar{x} = \bar{y} = 1$:

$$m_x^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} - (\varphi_{ex}^* + m_y^0 \varphi_{ex}^{dam} + m_{y,\phi 1}^0 \varphi_{ex,\phi 1} + m_{y,\phi 2}^0 \varphi_{ex,\phi 2})}{\varphi_{ex}^{dam} K_{d,x1}} - m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1}}{\varphi_{ex}^{dam}} \left(1 + \frac{m_{x,\phi 2}^0 \varphi_{ex,\phi 2} K_{d,x2}}{m_{x,\phi 1}^0 \varphi_{ex,\phi 1} K_{d,x1}} \right) \quad (3.27)$$

При рассмотрении изгибно-крутильной формы – m_y^0 определяется из сопоставления (3.10) и (3.19), когда $\bar{x} = \bar{y} = 1$:

$$m_y^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} - (\varphi_{yc}^* + m_{x,u}^0 \varphi_{yc}^{dam} + m_{x,\phi 1}^0 \varphi_{yc,\phi 1} + m_{x,\phi 2}^0 \varphi_{yc,\phi 2})}{\varphi_{yc}^{dam} K_{d,y1}} - m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}} \left(1 + \frac{m_{y,\phi 2}^0 \varphi_{yc,\phi 2} K_{d,y2}}{m_{y,\phi 1}^0 \varphi_{yc,\phi 1} K_{d,y1}} \right) \quad (3.28)$$

Для определения концевых относительных эксцентриситетов при пространственной форме деформирования элемента сопоставляются (3.12) и (3.19):

- $\bar{x} = 1, \bar{y} = 0$

$$m_y^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} (1 + m_y^*)}{(1 + m_x^* + m_y^*) \varphi_{exy}^{dam} K_{d,y1}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi 1}}{\varphi_{exy}^{dam}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,y1}} + m_{y,\phi 1}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,y1}} + \frac{\varphi_{exy,\phi 2}}{\varphi_{exy}^{dam}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,y1}} + m_{y,\phi 2}^0 \frac{K_{d,y2}}{K_{d,y1}} \right) \right] \quad (3.29)$$

- $\bar{x} = 0, \bar{y} = 1$

$$m_x^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} (1 + m_x^*)}{(1 + m_x^* + m_y^*) \varphi_{exy}^{dam} K_{d,x1}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi 1}}{\varphi_{exy}^{dam}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,x1}} + m_{x,\phi 1}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,x1}} + \frac{\varphi_{exy,\phi 2}}{\varphi_{exy}^{dam}} \cdot \left(\frac{1}{K_{d,x1}} + m_{x,\phi 2}^0 \frac{K_{d,x2}}{K_{d,x1}} \right) \right] \quad (3.30)$$

3.4.3 Определение коэффициентов потери устойчивости

Устойчивость элементов за пределом упругости традиционно исследуют путём последовательного увеличения нагрузки до момента потери равновесия. Каждый шаг нагружения неизбежно сопровождается громоздкими итерационными вычислениями, поскольку физическая и геометрическая нелинейности требуют совместного учёта, что существенно увеличивает общую трудоёмкость расчёта. В

предлагаемом методе определение предельной силы, при которой происходит потеря устойчивости, осуществляется путем наращивания i -ых деформированных состояний в сечении с наиболее нагруженным волокном $\bar{\varepsilon}_{\max,i} (0,8 + \Delta\bar{\varepsilon} \cdot i; \Delta\bar{\varepsilon} = 3,2/n; i = 1, 2, \dots, n)$, удерживая постоянными относительные концевые эксцентриситеты ($m_{x,i}^0 = \text{const}$ и $m_{y,i}^0 = \text{const}$) продольной силы $N^0(\varphi_i)$. Данный подход позволяет существенно сократить время расчетов. На рисунке 3.2 показана зависимость φ_i от $\bar{\varepsilon}_i$. Видно, что коэффициенты устойчивости определяется максимальным значением $\varphi^{\text{уст}} = \max(\varphi_i)$.

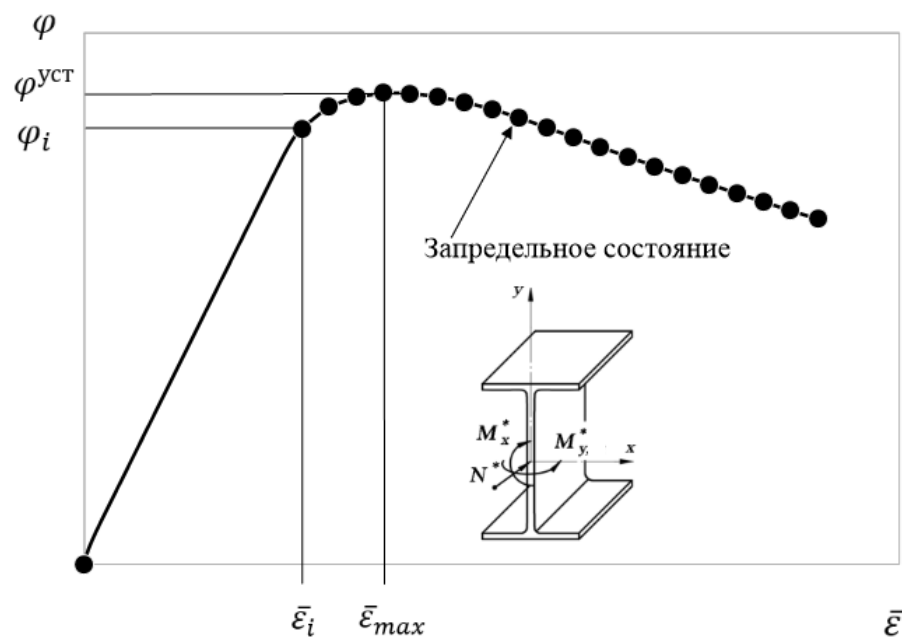


Рисунок 3.2 График зависимости коэффициента продольной силы от максимальной относительной деформации при $m_{x,i}^0 = \text{const}$ и $m_{y,i}^0 = \text{const}$.

3.5 Влияние общего коррозионного повреждения на устойчивость по изгибной форме

Рассматривается влияние относительной величины общего коррозионного повреждения $A_{cor}, \%$ (A_{cor} — снижение площади поперечного сечения при равномерном коррозионном износе) на устойчивость по изгибной форме для прокатного и оптимально скомпонованного сварного двутаврового элемента в зависимости от гибкости $\bar{\lambda}_x$, выраженного в виде коэффициента

$K_{ex}^{cor} = \varphi_{ex}^{cor} \cdot (A - A_{cor}) / \varphi_{ex} \cdot A$ (см. Рисунок 3.3). Сплошные линии соответствуют прокатному двутавровому элементу (30Ш1 по ГОСТ Р 57837-2017) при относительном эксцентриситете $m_x=2$, штриховые – $m_x=8$, а штрихпунктирные – оптимально скомпонованному на основе принципа равноустойчивости (имеются некоторые (см. Рисунок 3.3) запасы по местной устойчивости) сварного двутавра при $m_x=2-8$.

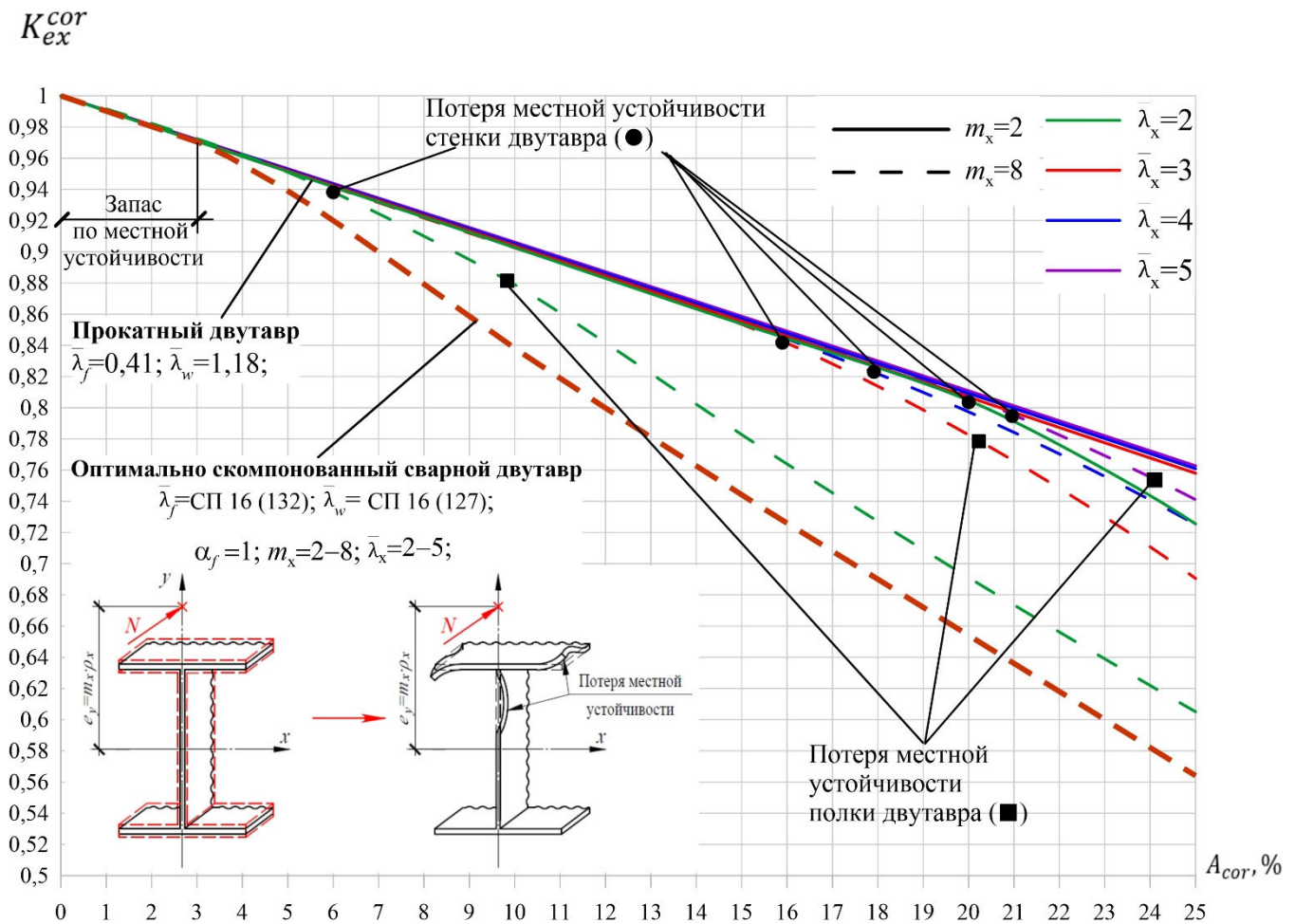


Рисунок 3.3 Влияние площади $A_{cor}, \%$ на устойчивость по изгибной форме стержневого элемента

Из графика (см. Рисунок 3.3) следует, что общее коррозионное повреждение, вызывающее уменьшение толщины элементов сечения прокатного двутавра и, как следствие, потерю местной устойчивости, при сокращении площади поперечного сечения на 1...25% снижает устойчивость в пределах 0,2%- 27,4% при $m_x=2$ и 0,1%- 39,5% при $m_x=8$, при этом потеря местной устойчивости происходит только при больших эксцентриситетах и малых гибкостях. Для оптимально

скомпонованного сварного двутавра потеря местной устойчивости элементов сечения происходит при незначительном коррозионном повреждении (2,5-3%), что приводит к более резкому снижению устойчивости в пределах 1,5%-46,3%.

3.6 Влияние симметричного локального повреждения на устойчивость по изгибной форме

Используя предложенную модель внецентренно сжатого стержня и разработанный математический расчетный аппарат [71] определим коэффициенты потери устойчивости для поврежденного φ_{ex}^{dam} (штриховые линии см. Рисунок 3.4) и неповрежденного φ_{ex} (сплошные) двутаврового элемента ($\alpha_f = A_f/A_w = 1,0$). Из графиков видно, что ослабление наиболее напряжённой полки площадью, составляющей 7,4% (см. Рисунок 3.4) и 11,1% (см. Рисунок 3.5) снижает устойчивость в пределах 11,3%...16,4% и 16,0%...23,4% соответственно, что в 1,5...2,2 раза больше площади ослабления. Большие значения относятся к меньшим условным гибкостям элемента $\bar{\lambda}_x$, а меньшие – к большим.

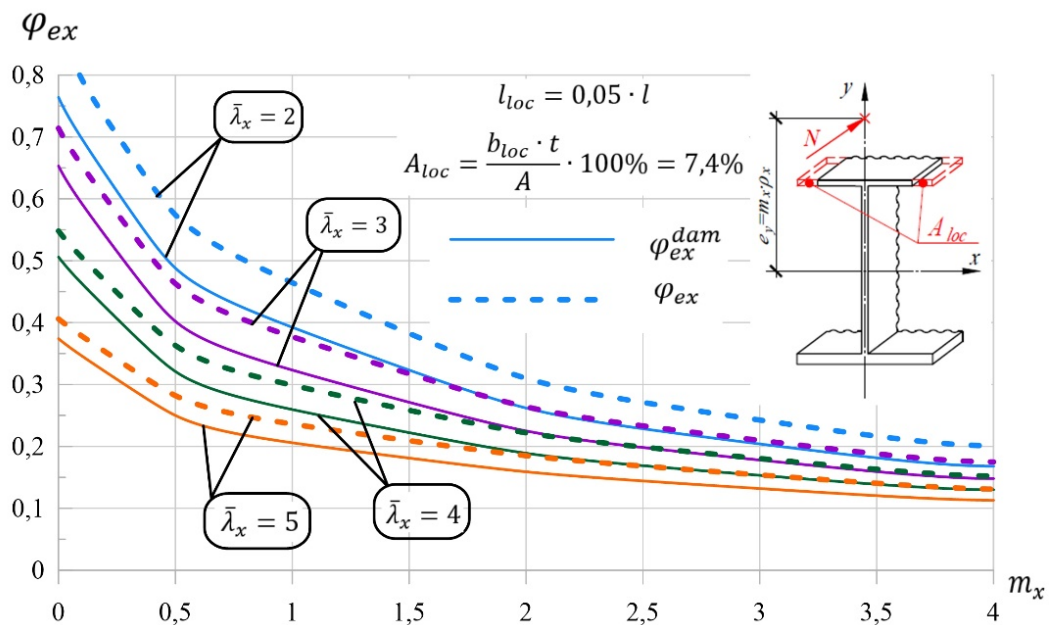


Рисунок 3.4 График зависимости коэффициента устойчивости повреждённого и неповреждённого элемента от m_x и $\bar{\lambda}_x$ при $A_{loc} = 7,4\%$

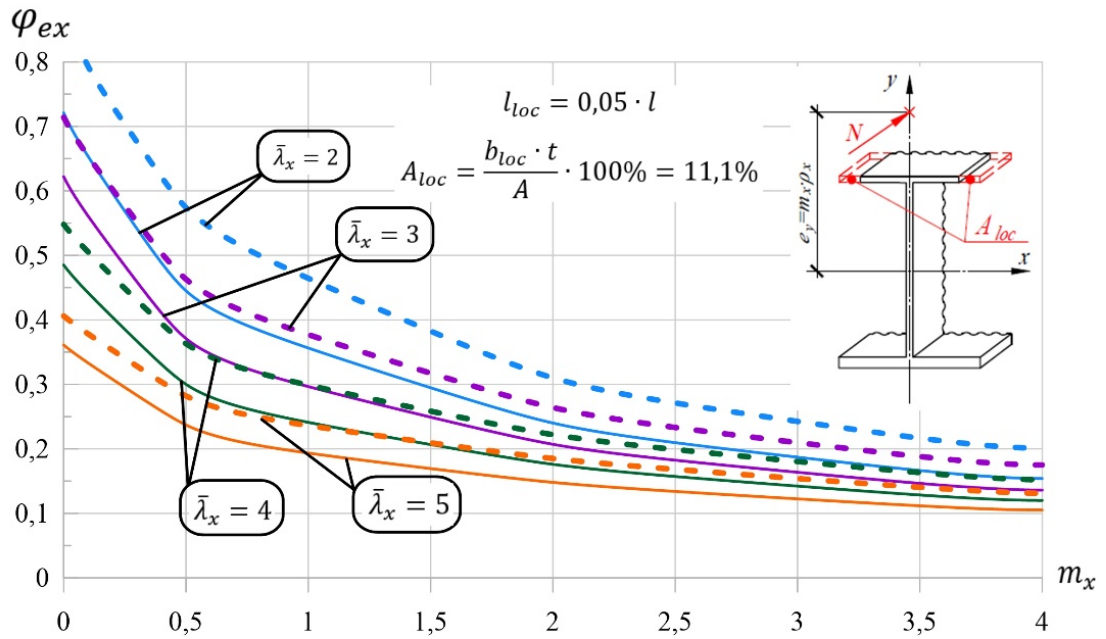


Рисунок 3.5 График зависимости коэффициента устойчивости повреждённого и неповреждённого элемента от m_x и $\bar{\lambda}_x$ при $A_{loc} = 11,1\%$

Влияние симметричного повреждения на снижение устойчивости по изгибной форме, выраженного $K_{ex}^{dam} = \varphi_{ex}^{dam} / \varphi_{ex}$, покажем на рисунке 3.5.

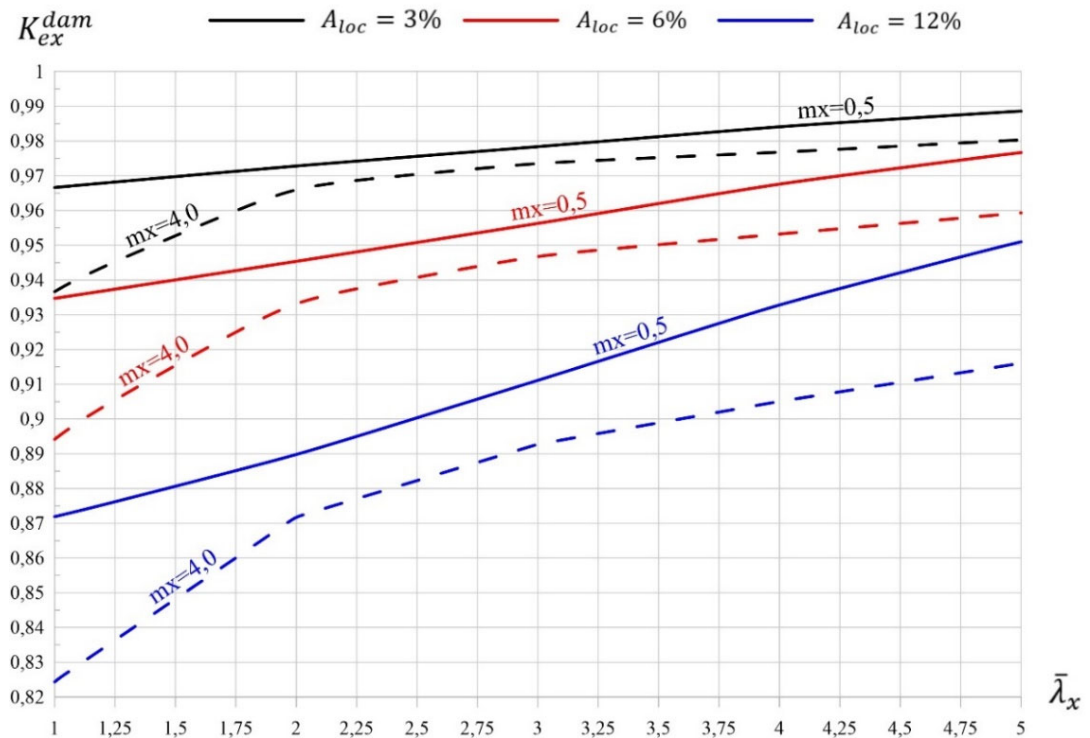


Рисунок 3.6 График зависимости коэффициента, учитывающего влияния симметричного ослабления на устойчивость по изгибной форме K_{ex}^{dam} от $\bar{\lambda}_x$ при

$$l_{loc} = 0,05 \cdot l$$

Из графика следует (см. Рисунок 3.6), симметричном ослабление наиболее напряжённого пояса площадью, составляющей 3% от общей площади, снижает устойчивость по изгибной форме в пределах 1,1-3,3% при $m_x=0,5$ и 2,0-6,3% при $m_x=4$, а при площади ослабления, составляющей 12% устойчивость снижается в пределах 4,9-12,8% при $m_x=0,5$ и 8,4-17,6% при $m_x=4$. Большие значения относятся к меньшим условным гибкостям элемента $\bar{\lambda}_x$, а меньшие – к большим.

Влияние длины повреждения l_{loc} показано на рисунке 3.7, откуда следует, что для внецентренно сжатых стержней ($m_x \geq 1$) увеличение длины повреждения приводит к незначительному снижению устойчивости.

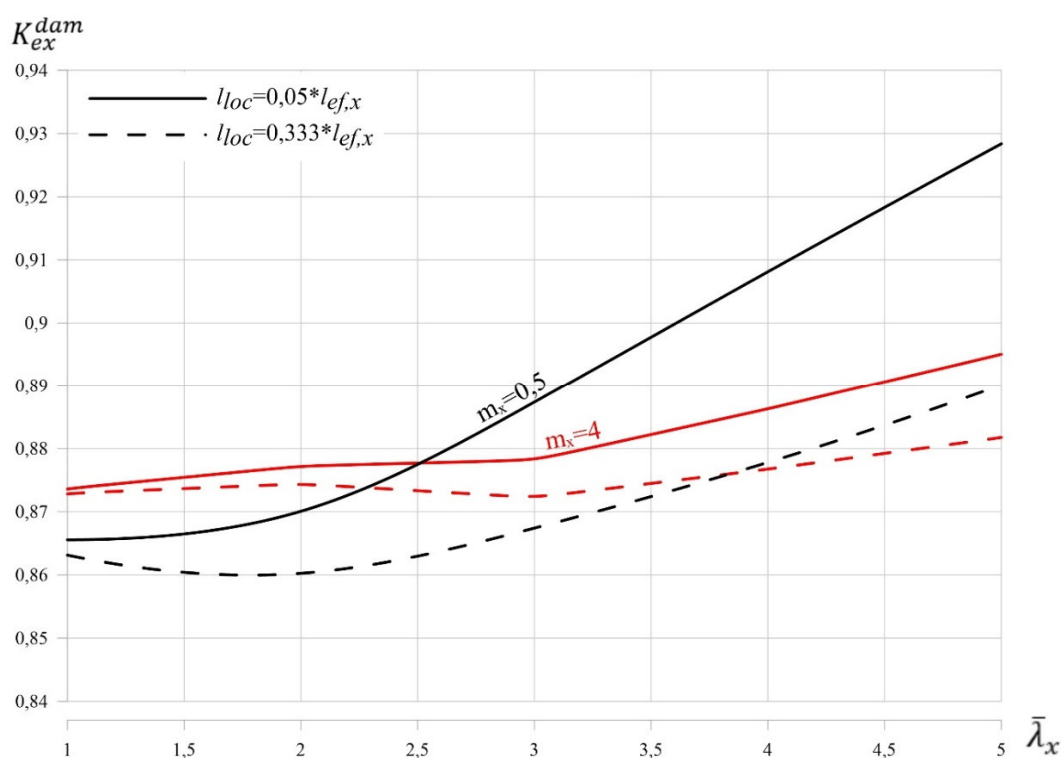


Рисунок 3.7 График зависимости коэффициента, учитывающего влияние ослабления на устойчивость по изгибной форме K_{ex}^{dam} от длины повреждения l_{loc}

3.7 Влияние общего коррозионного повреждения на устойчивость по изгибно-крутильной форме

Рассматривается влияние относительной величины общего коррозионного повреждения $A_{cor}, \%$ на устойчивость по изгибно-крутильной форме для прокатного и оптимально скомпонованного сварного двутаврового элемента в зависимости от гибкости $\bar{\lambda}_y$, выраженного в виде коэффициента $K_{yc}^{cor} = \varphi_{yc}^{cor} \cdot (A - A_{cor}) / \varphi_{yc} \cdot A$ (см. Рисунок 3.8). Сплошные линии соответствуют

прокатному двутавровому элементу (30Ш1 по ГОСТ Р 57837-2017) при относительном эксцентриситете $m_x=2$, штриховые – $m_x=8$, а штрихпунктирные – оптимально скомпонованному на основе принципа равноустойчивости (имеются некоторые (см. Рисунок 3.8) запасы по местной устойчивости) сварного двутавра при $m_x=2-8$.

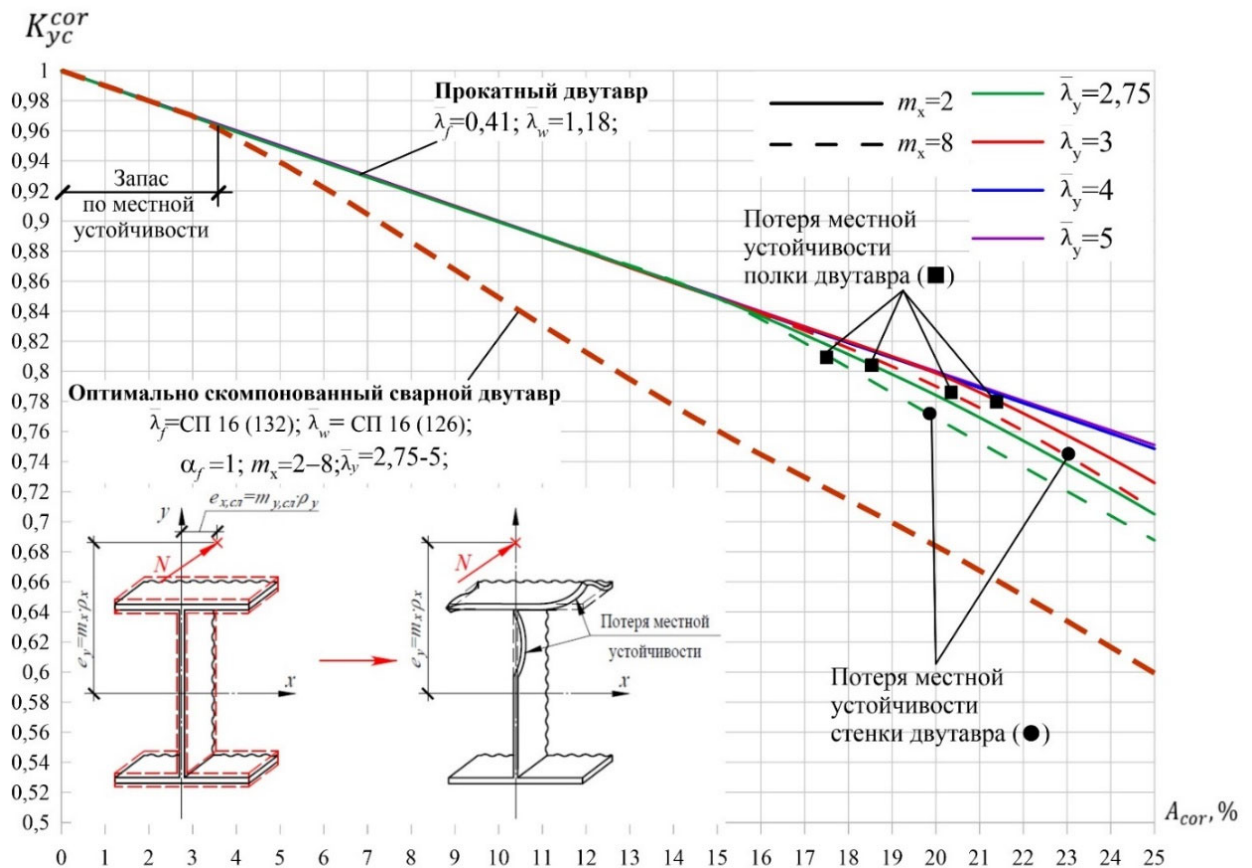


Рисунок 3.8 Влияние площади $A_{cor}, \%$ на устойчивость по изгибно-крутильной форме стержневого элемента

Из графика (см. Рисунок 3.8) следует, что общее коррозионное повреждение, вызывающее уменьшение толщины элементов сечения и, как следствие, потерю местной устойчивости, при сокращении площади поперечного сечения на 1...25% снижает устойчивость по изгибно-крутильной форме в пределах 0,3- 29,5% при $m_x=2$ и 0,2-31,2% при $m_x=8$, при этом потеря местной устойчивости происходит только при малых гибкостях. Для оптимально скомпонованного сварного двутавра потеря местной устойчивости элементов сечения происходит при незначительном коррозионном повреждении (3,5-4%), что приводит к более резкому снижению устойчивости в пределах 3,4%-40,1%.

3.8 Влияние локального повреждения на устойчивость по изгибно-крутильной форме

Рассмотрим влияние места расположения повреждения в сечении, находящемся в средней части длины стержня ($1/3 \cdot l$), относительно эксцентриситетов действующей по торцам продольной силы (см. Рисунок 3.9) в зависимости от его относительной величины ($A_{loc} = b_{loc} \cdot t / A$), % и относительной гибкости $\bar{\lambda}_y$ на устойчивость двутаврового ($\alpha_f = 1,0$) элемента, выраженного коэффициентом $K_{yc}^{dam} = \varphi_{yc}^{dam} / \varphi_{yc}$ (см. Рисунок 3.10 и Рисунок 3.11).

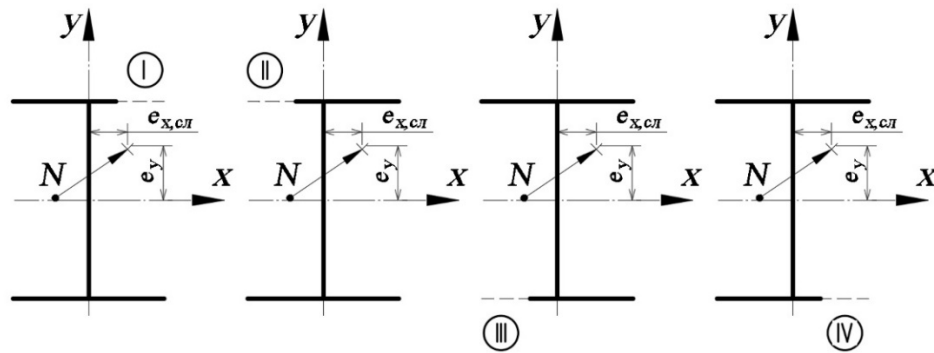


Рисунок 3.9 Место расположения повреждения

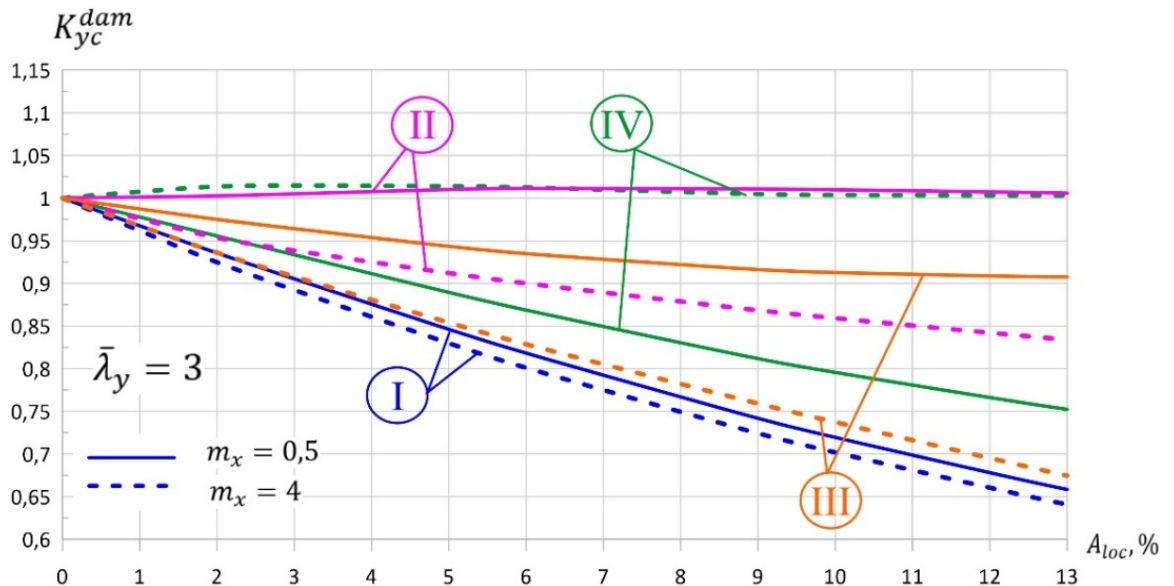


Рисунок 3.10 Влияние площади A_{loc} , % и места расположения повреждения в сечении на устойчивость по изгибно-крутильной форме при $\bar{\lambda}_y = 3$

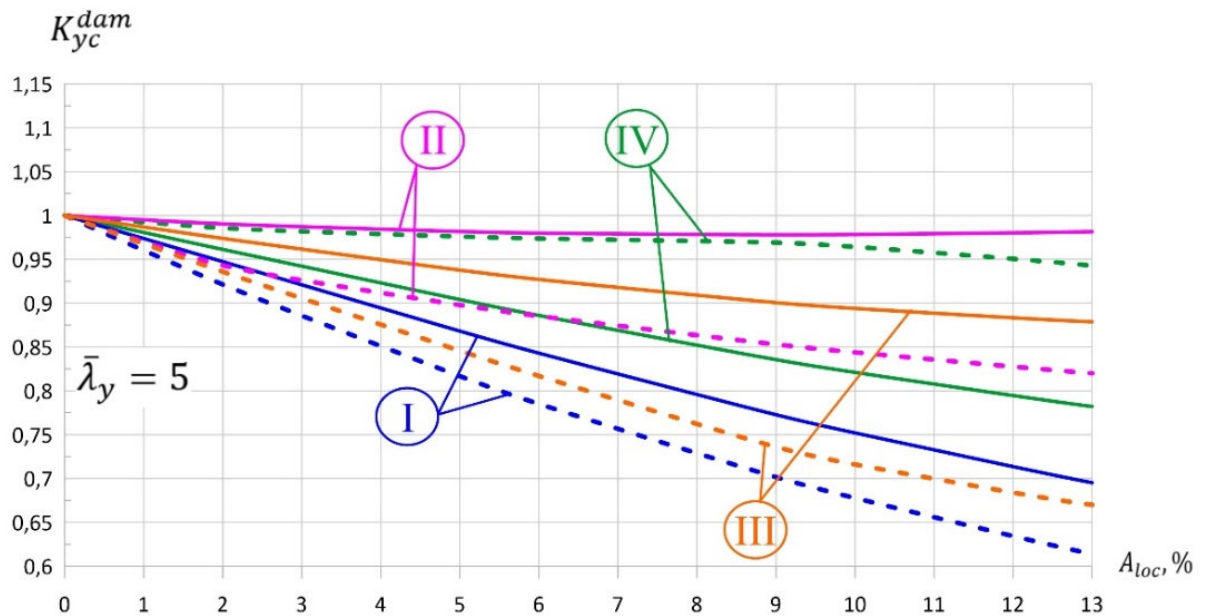


Рисунок 3.11 Влияние площади $A_{loc}, \%$ и места расположения повреждения в сечении на устойчивость по изгибно-крутильной форме при $\bar{\lambda}_y = 5$

Согласно результатам, представленным на рисунке 3.10, 3.11 и [20], локальное ослабление в средней части пролета в зависимости от места его расположения в сечении по-разному влияет на устойчивость. Если ослабление площадью 1,9-13% от полного сечения располагается в наиболее нагруженных зонах I и III, устойчивость снижается на 5,0-37,0% и 2,4-32,5% соответственно, превышая относительную площадь повреждения в 2,6-3,1 и 2,4-2,7 раза. В менее нагруженных зонах I и IV наблюдается снижение на 0,9-26,1% (в 1,1-2,2 раза больше A_{loc}) и незначительное увеличение до 1,1-1,3% (в 0,2-0,7 раза меньше A_{loc}) устойчивости. Подобное повышение устойчивости связано с тем, что ослабление в зоне II смещает центр тяжести сечения, тем самым уменьшая значение m_y . В зоне IV аналогичный разгружающий эффект создает m_x .

Анализируя график представленный на рисунке 3.12 можно утверждать, что значительное увеличение длины повреждения практически не влияет на устойчивость стального элемента по изгибно-крутильной форме.

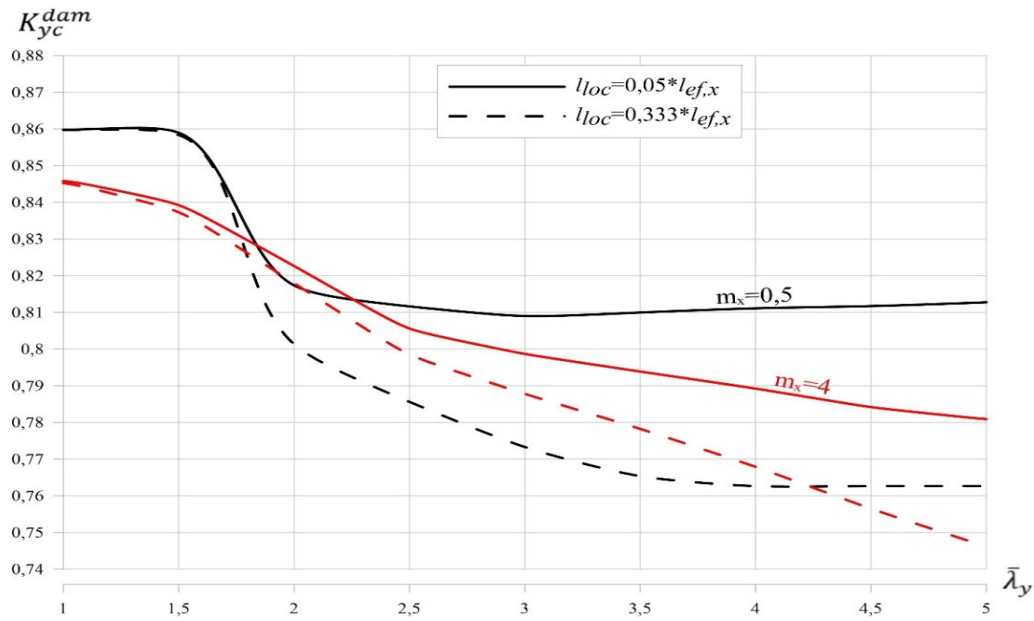


Рисунок 3.12 График зависимости коэффициента K_{yc}^{dam} , учитывающего влияния ослабления на устойчивость по изгибно-крутильной форме от длины повреждения l_{loc}

3.9 Влияние начального искривления оси элемента в двух главных плоскостях на устойчивость по изгибно-крутильной форме

Начальные искривления оси элемента в двух главных плоскостях, как известно, согласно пособию по проектированию усиления стальных конструкций [81], можно свести к дополнительным эквивалентным эксцентриситетам продольной силы, что в совокупности с эксцентриситетами заданных усилий даёт возможность выполнять расчет как для бездефектного элемента.

Переход от начального искривления оси элемента к эквивалентному эксцентриситету продольной силы выполняется по формуле:

$$e_{x(y)}^{\text{искр}} = f_{v(u)}^0 \cdot k_{x(y)} \quad (3.31)$$

где $k_{x(y)} = 0,82 + 0,1\sqrt{m_{x(y)}^{\text{искр}}/\bar{\lambda}_{x(y)}}$, $m_{x(y)}^{\text{искр}} = f_{v(u)}^0/\rho_{x(y)}$, $f_{v(u)}^0$ — начальные стрелки искривления.

Начальные искривления оси в двух главных плоскостях uoz , xoz со стрелками f_v^0 и f_u^0 соответственно принимаются по формам потери устойчивости (как худший вариант), что позволяет определить их по замеренным $f_{v,и}$, $f_{u,и}$ когда стержневой

элемент испытывает действие продольной силы $N_{и}$ при обследовании конструкций (см. Рисунок 3.13):

$$f_{v(u)}^0 = f_{v(u),и} \left(1 - \frac{\varphi_{и} \bar{\lambda}_{x(y)}^2}{\pi^2} \right) \quad (3.32)$$

где $\varphi_{и} = N_{и} / R_y A$; $\bar{\lambda}_x = (l_{ef,x} / i_x) \sqrt{R_y / E}$; $\bar{\lambda}_y = (l_{ef,y} / i_y) \sqrt{R_y / E}$.

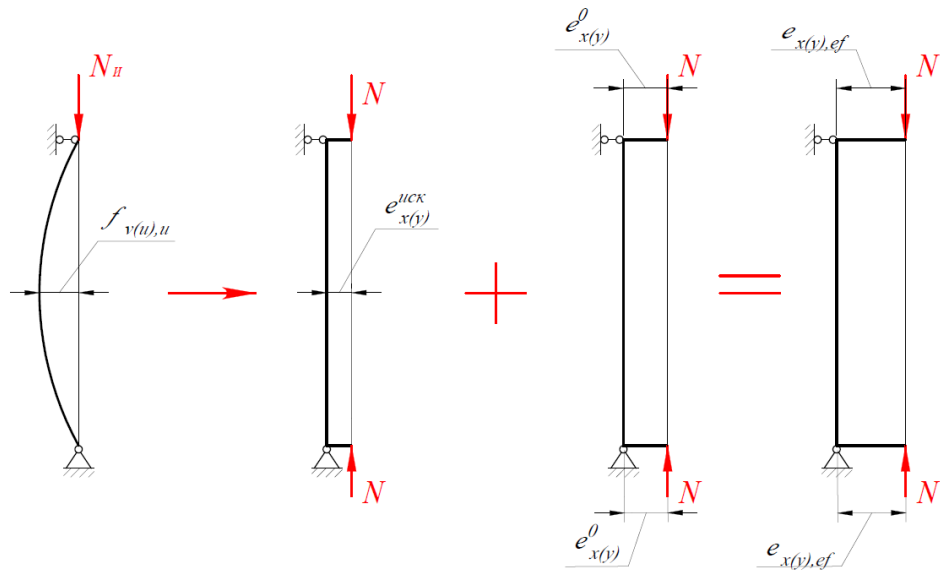


Рисунок 3.13 Расчетная схема стального элемента, имеющего начальные искривления оси в двух главных плоскостях

Эксцентриситеты продольной силы, которые учитывают начальные искривления оси в двух главных плоскостях определяется по формуле:

$$e_{x(y),ef} = e_{x(y)}^{искр} + e_{x(y)}^0 \quad (3.33)$$

Про анализируем влияние начального искривления оси элемента на устойчивость в зависимости от его направления относительно вектора действующих усилий. Для этого построим кривые для двутаврового элемента, которые покажут изменение коэффициента потери устойчивости от направления начального искривления оси. Направление двухосного начального искривления оси α (α – угол между осью x и двухосным начальным искривлением в плоскости сечения) изменяется через 5° , соответственно кривые построены по 72 точкам.

На рисунке 3.14 представлены кривые для дефектного (сплошные линии) и бездефектного (штрихпунктирные) элементов при различных значениях двухосного эксцентриситета $m = e / \rho_y$

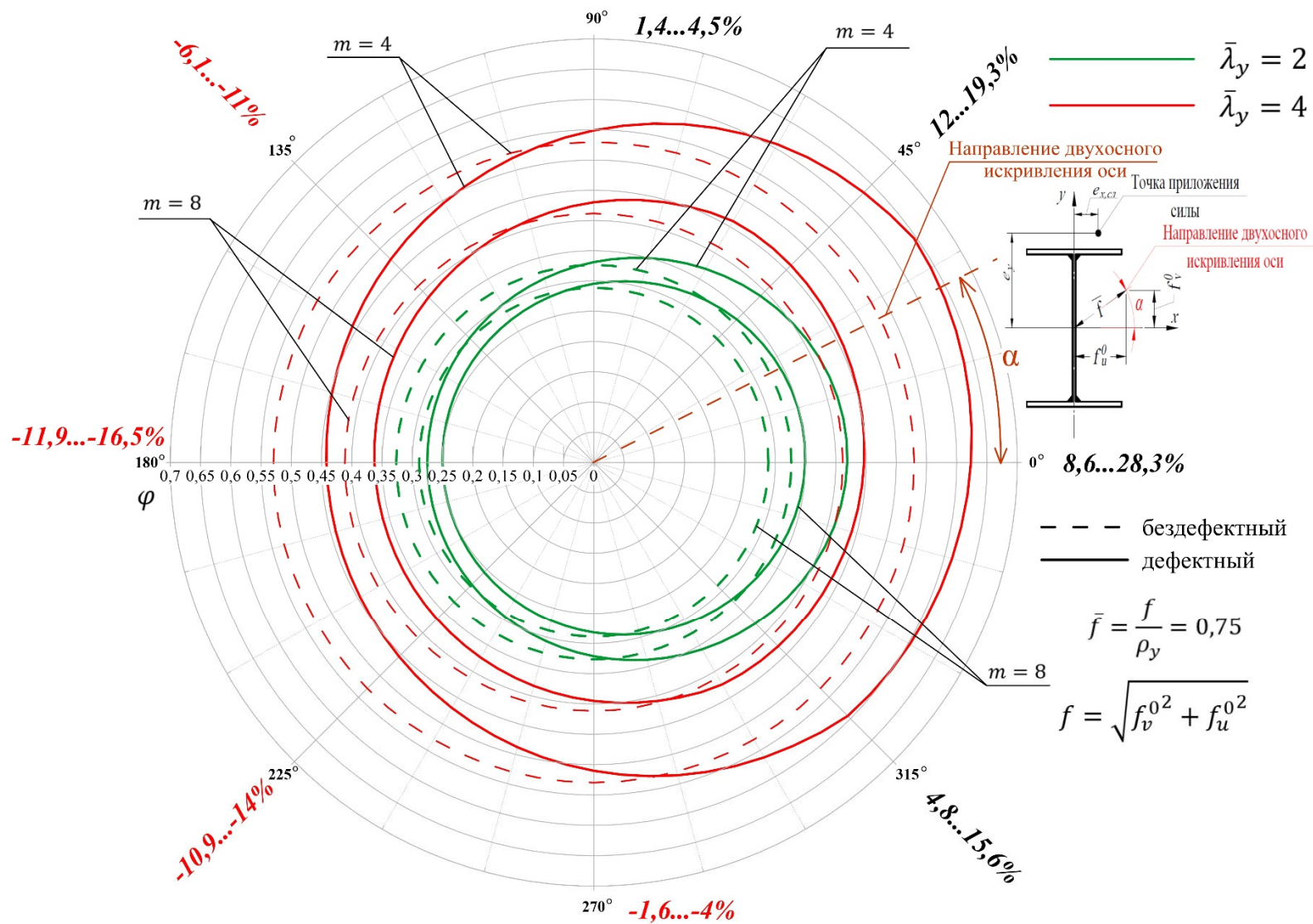


Рисунок 3.14 Влияние направления двухосного начального искривления оси $\bar{f} = 0,75$ на коэффициент потери устойчивости

На графиках (см. Рисунок 3.15) показано отношение коэффициента $K_{yc}^{def} = \varphi_{yc}^{def} / \varphi_{yc}$, определяемого как отношение коэффициента потери устойчивости с дефектом (двухосными начальными искривлениями, направления которых не совпадают с направлением эксцентриситетов продольной силы) элемента φ_{yc}^{def} к бездефектному φ_{yc} двутаврового элемента ($\alpha_f = 1,0$) в зависимости от величины дополнительных относительных эксцентриситетов $m_x^{искр}$ и $m_y^{искр}$, образовавшихся в результате начального искривления оси.

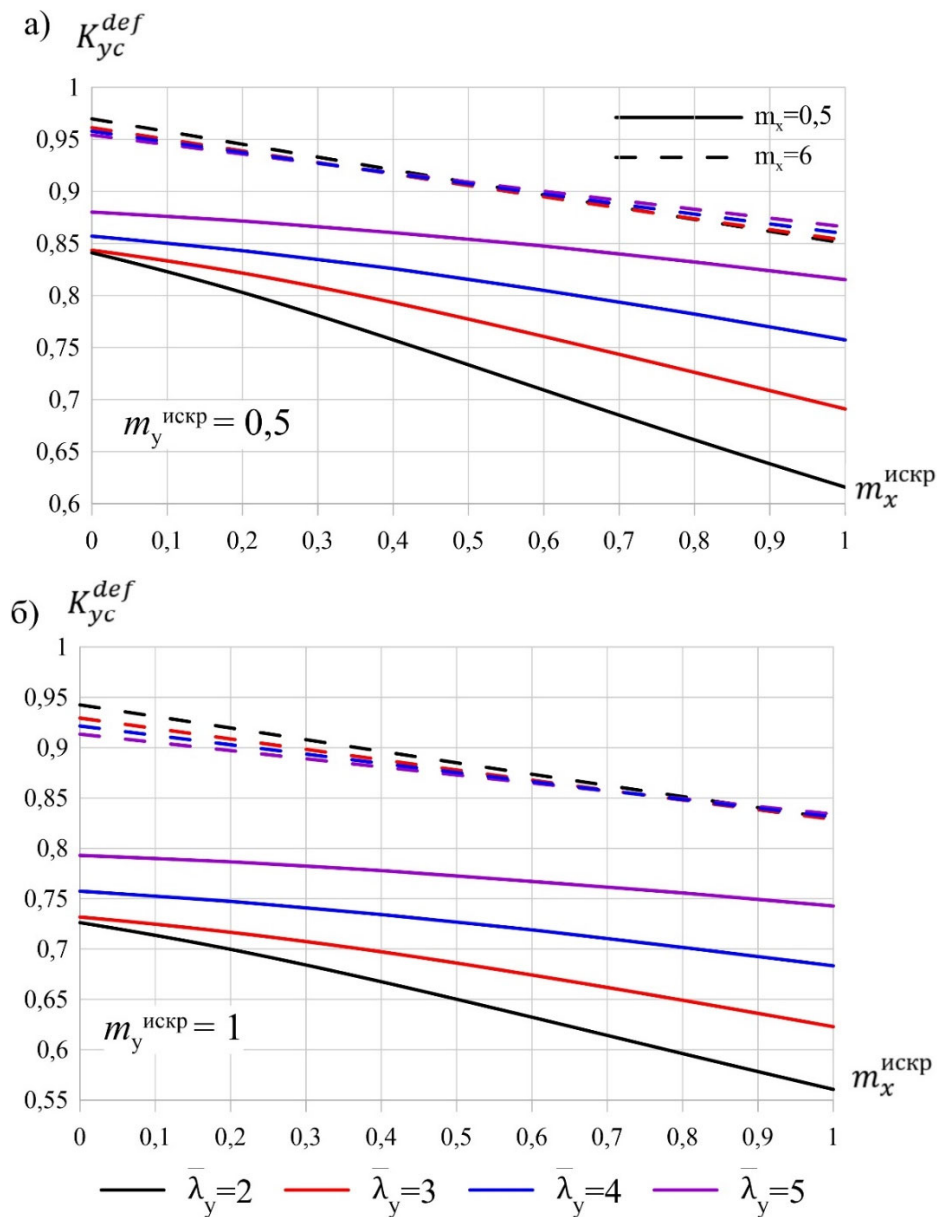


Рисунок 3.15 График зависимости коэффициента, учитывающего влияния дефекта в виде общего искривления осей на устойчивость по изгибно-крутильной форме

K_{yc}^{def} от $m_x^{искр}$ при: а) $m_y^{искр} = 0,25$; б) $m_y^{искр} = 0,5$

Из графиков (см. Рисунок 3.15) следует, что общее искривление осей снижает устойчивость по изгибно-крутильной форме в пределах 3,0%-38,4% при $m_y^{\text{искр}}=0,5$ и 5,7%-43,9% при $m_y^{\text{искр}}=1$.

3.10 Определение коэффициента потери устойчивости методом конечных элементов

Для проведения численного эксперимента используется программный комплекс ANSYS Workbench, позволяющий проводить конечно-элементный анализ.

В ходе подготовки численного эксперимента в среде ANSYS Workbench особое внимание было уделено выбору типа конечных элементов. В качестве альтернатив рассматривались объемные и пластинчатые (оболочечные) элементы. Для анализа тонкостенного двутаврового элемента с обобщенным повреждением было выбрано использование пластинчатых элементов, так как применение объемных конечных элементов в данном случае не обеспечивает ощутимого прироста точности, но существенно увеличивает время вычислений. В связи с этим, моделирование геометрии стержня с повреждением в виде выреза было выполнено в модуле SpaceClaim с помощью пластинчатых элементов (Surface).

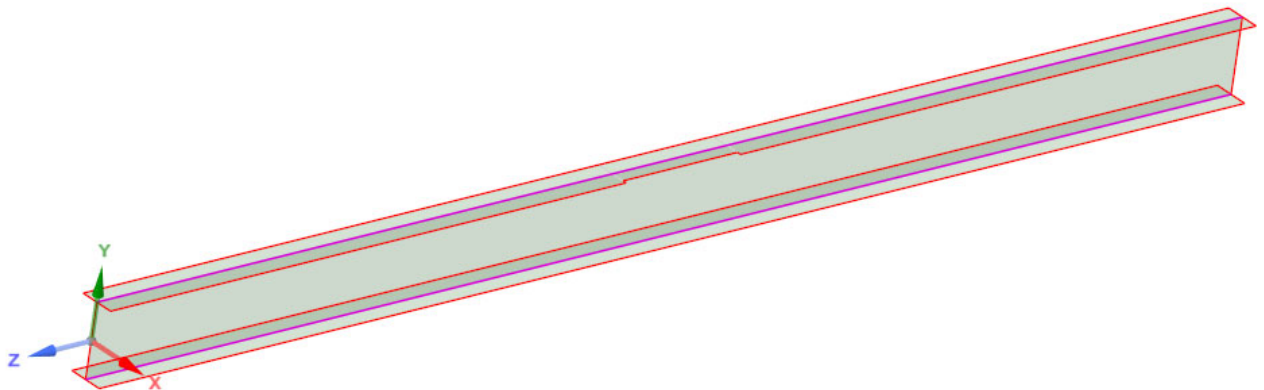


Рисунок 3.16 Расчетная схема поврежденного стержня

Материал стержней принят – сталь С245 с пределом текучести 240 Н/мм², по унифицированной диаграмме работы стали [11] принята зависимость $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$. Геометрическая модель разбивалась на упорядоченную четырехугольную сетку.

Для формирования граничных условий торцевые узлы двутавра с каждой из сторон соединялись с абсолютно жёстким конечным элементом, установленным на шарнирной опоре, смещённой относительно центральной оси сечения на величину эксцентриситетов. Процесс нагружения моделировался путём принудительного перемещения одной опоры в направлении исходной оси двутавра и продолжался до возникновения нисходящего участка на графике зависимости между продольной реакцией опоры и её перемещением. Координата максимума указанной кривой принималась за предельное значение нагрузки для данной расчётной модели.

Решение нелинейной численной задачи осуществлялось итерационным методом Ньютона-Рафсона в постановке, учитывающей геометрическую нелинейность через расчёт по деформированной схеме. Число шагов нагружения варьировалось в диапазоне от 100 до 200.

Вычисленное значение сжимающей нагрузки, соответствующее наступлению потери устойчивости, приводилось к безразмерному виду $\varphi^{\text{МКЭ}} = N^{\text{МКЭ}} / R_y A$ с целью последующего сравнения с результатами обратного численно-аналитического метода, предлагаемого в настоящей работе.

Normal Stress
Type: Normal Stress(Z Axis) - Top/Bottom
Unit: MPa
Global Coordinate System
Time: 0,15
24.04.2026 12:09

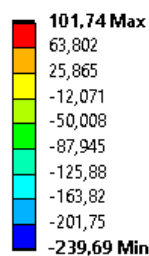


Рисунок 3.17 Нормальные напряжения в предельном состоянии при различных относительных концевых эксцентриситетах

3.11 Сравнительный анализ методов расчета на устойчивость внецентренно сжатых поврежденных элементов, изгибаемых в плоскости большей жесткости

Для проверки достоверности используемого обратного численно-аналитического метода расчёта, сопоставим полученные результаты расчета устойчивости по изгибной форме с расчётами методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS (см. Таблица 3.1).

Таблица 3.1 Отношение $1 - \Phi_{ex,МКЭ}^{dam} / \Phi_{ex}^{dam}$ для двутаврового сечения

m_x	$\bar{\lambda}_x$							
	2		3		4		5	
	$A_{loc}=7,4\%$	$A_{loc}=11,1\%$	$A_{loc}=7,4\%$	$A_{loc}=11,1\%$	$A_{loc}=7,4\%$	$A_{loc}=11,1\%$	$A_{loc}=7,4\%$	$A_{loc}=11,1\%$
0,5	-4,10	-5,17	-4,23	-5,66	-4,05	-6,00	-4,00	-6,33
2	-3,05	-2,92	-2,22	-3,38	-1,06	-5,11	-1,89	-4,05
4	-0,60	-0,65	-1,35	0,00	-0,77	-3,33	-0,88	-1,90

Сравнение результатов свидетельствует о вполне достоверном решении задачи устойчивости повреждённых элементов. Наибольшие расхождения составляют 6,33%, данные расхождения можно объяснить тем, что в обратной численно-аналитической методике развитие пластических деформаций в наиболее нагруженном неповреждённом сечении распространяется по всей длине стержня.

3.12 Сравнительный анализ методов расчета на устойчивость внецентренно сжатых поврежденных элементов, изгибаемых в двух главных плоскостях

С целью верификации разработанного метода расчета проводится расчёт двутаврового элемента с обобщённым повреждением в виде краевого выреза полки, геометрические параметры которого составляют $b_{loc} = 20\text{ мм}$, $l_{loc} = 0,1 \cdot l$ (см. Рисунок 3.18), при различных сочетаниях двухосных эксцентриситетов e_x^o , e_y^o приложенной продольной сжимающей силы. Полученных результаты представлены в таблице 3.2.

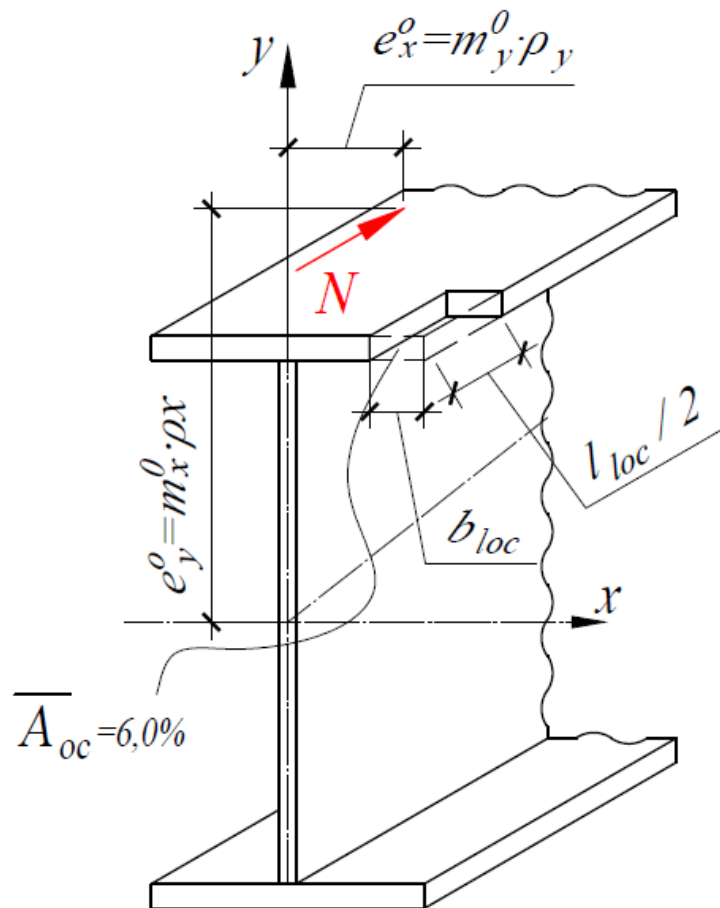


Рисунок 3.18 Расчетная схема двутаврового стержня с ослабленной полкой
 Параметры геометрических характеристик сечения поврежденного элемента:

- площадь полного сечения повреждения $A = 2849 \text{ мм}^2$;
- площадь ослабления $A_{oc} = 170 \text{ мм}^2$;
- моменты инерции полного сечения $I_x = 20511280 \text{ мм}^4$, $I_y = 1416525 \text{ мм}^4$;
- моменты инерции ослабления сечения $I_{x,0} = 1700000 \text{ мм}^4$, $I_{y,0} = 277652 \text{ мм}^4$;
- моменты сопротивления полного сечения $W_x = 214217 \text{ мм}^3$, $W_y = 28330 \text{ мм}^3$;
- радиусы инерции полного сечения $i_x = 84,5 \text{ мм}$, $i_y = 22,3 \text{ мм}$;
- ядровые расстояния полного сечения $\rho_x = 75,2 \text{ мм}$, $\rho_y = 9,9 \text{ мм}$.

Таблица 3.2 Коэффициенты потери устойчивости при расчете по различным методикам расчета

$\bar{\lambda}_y$	m_x	m_y	$\varphi^{\text{Алг}}$	$\varphi^{\text{МКЭ}}$	$(1 - \varphi^{\text{Алг}} / \varphi^{\text{МКЭ}}) \cdot 100\%$
2	0,5	0,25	0,572	0,606	-6,0
		1	0,519	0,546	-5,1
		2	0,435	0,445	-2,3
	2	0,25	0,323	0,339	-5,1
		1	0,307	0,311	-1,2
		2	0,282	0,295	-4,7
	4	0,25	0,190	0,201	-5,7
		1	0,185	0,191	-3,2
		2	0,177	0,180	-1,7
3	0,5	0,3	0,437	0,469	-7,4
		1	0,401	0,433	-8,0
		2	0,334	0,349	-4,4
	2	0,3	0,278	0,292	-5,2
		1	0,266	0,271	-1,9
		2	0,241	0,250	-3,8
	4	0,3	0,173	0,186	-7,5
		1	0,169	0,172	-1,9
		2	0,160	0,170	-6,0
4	0,5	0,35	0,325	0,339	-4,2
		1	0,306	0,323	-5,6
		2	0,258	0,270	-4,6
	2	0,35	0,234	0,243	-4,0
		1	0,225	0,227	-0,7
		2	0,202	0,210	-3,7
	4	0,35	0,156	0,163	-4,6
		1	0,153	0,153	0,1
		2	0,143	0,148	-3,3
5	0,5	0,4	0,245	0,250	-2,0
		1	0,236	0,241	-1,9
		2	0,203	0,210	-3,4
	2	0,4	0,193	0,202	-4,4
		1	0,188	0,193	-2,4
		2	0,169	0,174	-3,0
	4	0,4	0,139	0,143	-2,9
		1	0,137	0,138	-0,8
		2	0,127	0,129	-1,2

Сравнение теоретических значений коэффициента потери устойчивости, полученных обратным численно-аналитическим методом ($\varphi^{\text{Алг}}$) с методом конечных элементов с помощью программы ANSYS ($\varphi^{\text{МКЭ}}$), показал их высокую сходимость.

Максимальное отличие $\varphi^{\text{Алг}}$ от $\varphi^{\text{МКЭ}}$ не превысило 8,0%, что свидетельствует о достоверности используемого метода расчета.

3.13 Практический метод расчета на устойчивость стержневых элементов стальных конструкций, имеющих дефекты и повреждения

Полученные результаты исследования влияния повреждений и начального искривления оси элемента на устойчивость по изгибной и изгибно-крутильной формам, выраженные коэффициентами снижения устойчивости K_{ex} и K_{yc} , могут быть использованы для проверки устойчивости поврежденного элемента по формулам, представленным в действующих нормах проектирования [95], как для неповрежденного элемента с учетом коэффициентов, учитывающих влияние дефектов и повреждений.

Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости, с учетом влияния дефектов и повреждений, выполняется по формуле:

$$\frac{N}{K_{ex} \varphi_{ex} A R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (3.34)$$

Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии из плоскости действия момента при изгибе их в плоскости наибольшей жесткости, с учетом влияния дефектов и повреждений, выполняется по формуле:

$$\frac{N}{K_{yc} \varphi_{yc} A R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (3.35)$$

Расчет на устойчивость при сжатии и изгибу в двух главных плоскостях, с учетом влияния дефектов и повреждений, выполняется по формуле:

$$\frac{N}{K_{exyc} \varphi_{exyc} A R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (3.36)$$

где $K_{ex(yc)}^{def}$ – коэффициенты, учитывающие влияние начального искривления оси элемента; $K_{ex(yc)}^{cor}$ – учитывают влияние общего коррозионного повреждения; $K_{ex(yc)}^{dam}$ – учитывают влияние локального повреждения в виде выреза, принимаемые равными: $K_{ex(yc)}^{dam} = 1$ – если вырез расположен на концевом участке стержня; представленным в настоящем исследовании значениям – если вырез расположен в пределах средней трети длины стержня; по интерполяции – в прочих случаях.

3.14 Выводы по главе

1. Обратный численно-аналитический метод расчета на устойчивость обобщен на стальные элементы с дефектами и повреждениями.

2. Установлена зависимость устойчивости по изгибной и изгибно-крутильной формам от величины и места расположения повреждения и (или) начального искривления.

3. Определено влияние общего коррозионного повреждения на устойчивость стальных элементов, с учетом потери местной устойчивости утоненных элементов сечения.

4. Выявлено весьма существенное влияние места расположения повреждения в сечении и (или) направления начального искривления оси элемента на устойчивость. При этом следует заметить, что одно и то же значение параметра повреждения и (или) начального искривления может приводить элемент конструкции к работоспособному, ограниченно- или неработоспособному состоянию. Все зависит от места их расположения относительно действующих усилий. Учитывая последнее, проверку устойчивости следует проводить также по комбинации усилий, составленной применительно к месту повреждения элемента.

5. Сравнительный анализ коэффициентов потери устойчивости, вычисленных предложенным методом расчёта на устойчивость и методом конечных элементов для стальных стержней с ослаблением сечения в виде выреза, выявило хорошую степень согласованности результатов, что свидетельствует о достоверности разработанного расчётного метода.

6. Разработан практический метод расчета на устойчивость эксплуатируемых металлических конструкций с дефектами и повреждениями, гармонизированный с действующими нормами проектирования.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЛОКАЛЬНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ В ВИДЕ ВЫРЕЗА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУТАВРОВОГО ЭЛЕМЕНТА

В данной главе диссертационной работы представлено экспериментальное исследование влияния обобщенного локального повреждения в виде выреза расположенного в наиболее напряженной средней части двутаврового элемента. Установлено влияние величины и места расположения повреждения относительно вектора действующих усилий на пространственные деформации и устойчивость стержня. Определено, что сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений предельных сил, полученных по разработанному методу расчета, представленному в третьей главе, показал их высокую сходимость.

4.1 Цель и задачи исследования

Экспериментальные исследования устойчивости стальных конструкций представлены в работах Родикова Н.Н. [89], Пяткина П.А. [84], Михаськина В.В. [74], а также в работах [111, 112, 115, 120, 121, 122, 128, 129, 133] зарубежных авторов. Исследованиями устойчивости стержней с дефектами и повреждениями занимались Сотников Н.Г. [94] (сечения из спаренных уголков), Эдо Л.К. [60] (сечения из одиночных уголков), Мункуева Е.М. [76] (крестовые сечения) и Кацеф Э.Б. [57] (решетчатые стойки). Выводы, сформулированные в рамках указанных исследований, не могут быть перенесены на элементы двутаврового сечения. Следует также подчеркнуть, что в упомянутых работах осталось неизученным влияние дефектов и повреждений применительно к различным схемам их расположения в сечении относительно вектора действующих усилий.

Цель данного экспериментального исследования заключается в верификации теоретических результатов, полученных с использованием предложенного численно-аналитического расчета устойчивости элементов конструкций с

локальным повреждением полки в виде вырезов с различными схемами их расположения в сечении относительно действующих усилий.

Основные задачи эксперимента:

1. Изучение поведения двутавровых стержней, нагруженных продольной силой с двухосным эксцентриситетом и ослабленных локальным краевым вырезом полки.
2. Выявление форм потери устойчивости и закономерностей их изменения в зависимости от положения краевого выреза в поперечном сечении относительно вектора приложенных усилий.
3. Оценка влияния размеров локального повреждения и его местоположения на пространственное деформирование стержня и его несущую способность по устойчивости.
4. Экспериментальное определение предельных нагрузок с последующей проверкой их соответствия теоретическим значениям.

4.2 Опытные образцы

Геометрические размеры образцов определялись возможностями имеющегося в лаборатории №011Е Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета испытательного оборудования. Ограничение по длине стержня для вертикального прессы Newtons 1000 составляет 2 м. На основе этого условия и заданной максимальной гибкости были выбраны размеры двутавров (10У по ГОСТ 35087 [47]). Геометрия стержней показана на рисунке 4.1, а их расчетные геометрические характеристики приведены в таблице 4.1. Для обеспечения плавного нагружения к торцам образцов были приварены опорные плиты толщиной 9 мм. Сборка опытных образцов включала соединение опорных плит полуавтоматической сваркой. Перед сваркой торцы каждого двутавра были обработаны на расточном станке торцевой фрезой с обеспечением жестких допусков на перпендикулярность относительно продольной оси образца. На этапе заводского изготовления в полках образцов были выполнены локальные ослабления в виде вырезов полки (см. Рисунок 4.1). Сводные параметры испытательных образцов и конфигурация краевого выреза представлены в таблице 4.2.

Всего испытано 24 стержня, имеющих реальные размеры элементов конструкции [72]. Образцы были изготовлены на заводе металлоконструкций ДК- Спецстрой из двутавров 10У по ГОСТ 35087. Сталь для опытных образцов принята СтЗсп по ГОСТ 535 [42].

Таблица 4.1 Геометрические характеристики двутавра 10

$A, \text{см}^2$	$I_x, \text{см}^4$	$I_y, \text{см}^4$	$W_x, \text{см}^3$	$W_y, \text{см}^3$	$i_x, \text{см}$	$i_y, \text{см}$
12,0	198,0	17,9	39,7	6,49	4,06	1,22

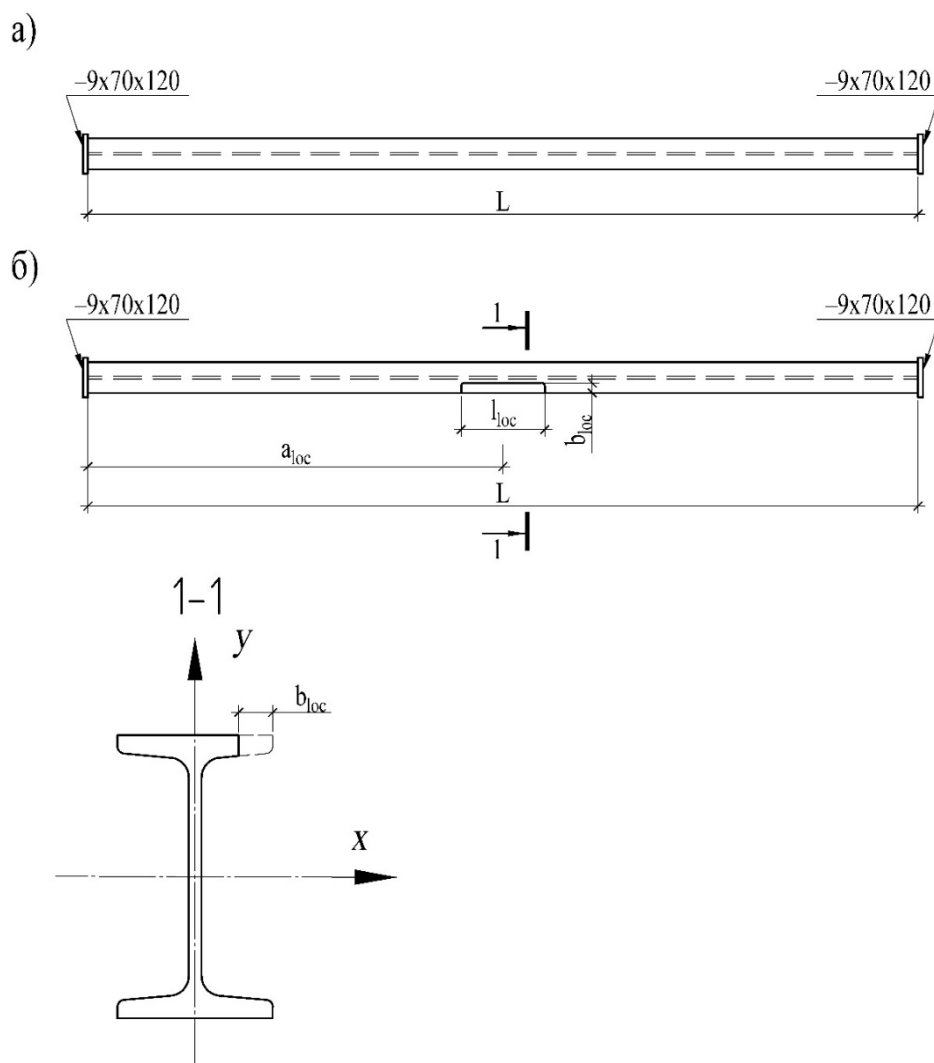
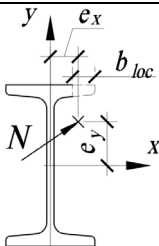
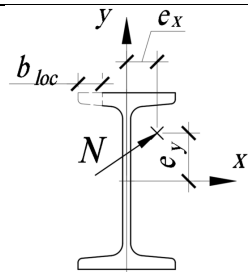
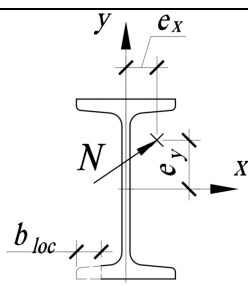
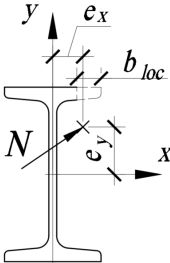
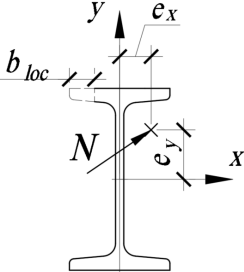
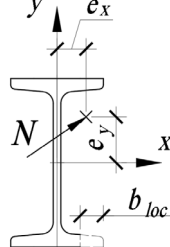


Рисунок 4.1 Виды испытательных образцов двутавров с торцевыми пластинами:
а) неповрежденный стержень; б) стержень с локальным повреждением в виде краевого выреза

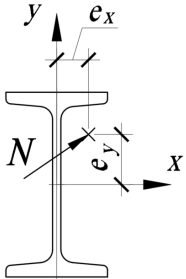
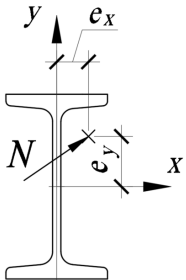
Таблица 4.2 Параметры локального краевого выреза в экспериментальных стержнях

№	Серия	Кол-во образцов в серии	Расположение краевого выреза	Геом. Длина стержня L, мм	Эксцентриситеты, мм		Параметры краевого выреза, мм			Площадь краевого выреза, $A_{loc}, \%$
					e_x	e_y	a_{loc}	l_{loc}	b_{loc}	
1	A1	3		1488	5	33	744	150	14	9,3
2	A2	3		1488	5	33	744	150	14	9,3
3	A3	3		1488	5	33	744	150	14	9,3

Продолжение Таблицы 4.2

№	Серия	Кол-во образцов в серии	Расположение краевого выреза	Геом. Длина стержня L, мм	Эксцентриситеты, мм		Параметры краевого выреза, мм			Площадь краевого выреза, $A_{loc}, \%$
					e_x	e_y	a_{loc}	l_{loc}	b_{loc}	
4	A4	3		1120	5	33	560	110	14	9,3
5	A5	3		1120	5	33	560	110	14	9,3
6	A6	3		1120	5	33	560	110	14	9,3

Окончание таблицы 4.2

№	Серия	Кол-во образцов в серии	Расположение краевого выреза	Геом. Длина стержня L, мм	Эксцентриситеты, мм		Параметры краевого выреза, мм			Площадь краевого выреза, $A_{loc}, \%$
					e_x	e_y	a_{loc}	l_{loc}	b_{loc}	
7	B1	3		1488	5	33	-	-	-	-
8	B2	3		1120	5	33	-	-	-	-

4.3 Механические характеристики стали экспериментальных образцов

В результате испытаний на растяжение 5 образцов, отобранных из полок двутавровой стойки в соответствии с требованиями [44], были определены фактические механические характеристики стали. По методике, рекомендуемой в [43], предел текучести устанавливался на плоских образцах, которые были вырезаны механическим способом. Заготовки для образцов выбирались из зон профиля, испытывавших о данным тензодатчиков минимальные деформации в упругой стадии (в полке вблизи опор). По итогам испытаний (см. таблицу 4.3) установлены следующие значения: предел текучести $\sigma_T = 310,2 \text{ МПа}$, временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 447,32 \text{ МПа}$ и модуль упругости $E = 2,051 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Таблица 4.3 Механические характеристики стали

№	A, см ²	N _T , кН	N _B , кН	σ_T , МПа	σ_B , МПа	E, МПа·10 ⁵
1	0,897	27,05	39,32	301,65	438,35	2,039
2	0,875	27,65	40,00	316,02	457,14	1,983
3	0,879	27,27	39,2	310,24	446,01	2,159
4	0,880	27,95	40,09	317,44	455,36	2,062
5	0,884	27,02	38,89	305,46	439,76	2,013

4.4 Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории №011Е Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Установка для испытания моделей стоек на сжатие с двухосным эксцентриситетом была сконструирована на базе пресса Newtons 1000. Общий вид установки показан на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 Общий вид испытательной установки с установленным испытательным образцом

Для обеспечения опорного закрепления экспериментальных образцов были применены ножевые шарниры. Конструкция данных устройств, представлена на рисунке 4.3а, состоит из трёх пластин, оснащённых коническими углублениями и ответными выступами («ножами»). Такое решение реализует шарнирное опирание, обеспечивающее две степени свободы в виде вращений вокруг горизонтальных осей.

Фиксация испытываемых стержней в заданном положении с требуемыми двухосными эксцентриситетами относительно оси шарнира осуществляется регулировочными опорными винтами в комплекте с крепежными планками (рисунок 4.3б).

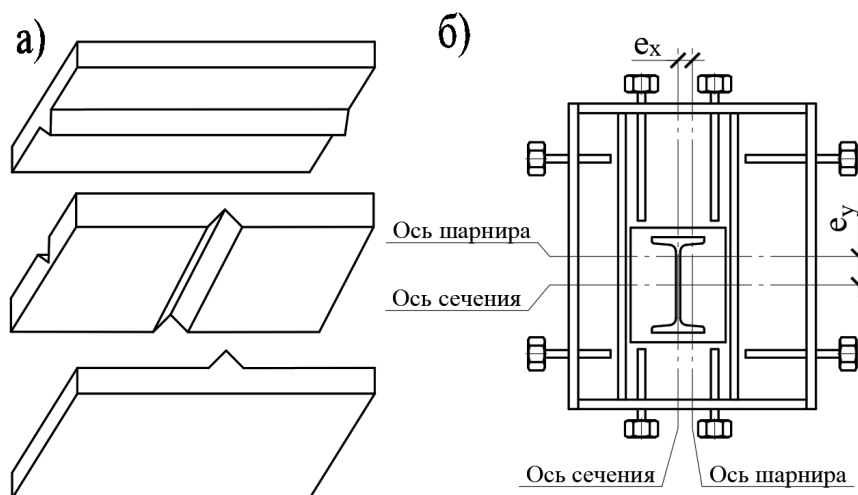


Рисунок 4.3 а) 3 плиты ножевого шарнира; б) Схема нижнего и верхнего опорного узла

4.5 Измерительная аппаратура и оборудование

В рамках экспериментального исследования был реализован системный мониторинг деформаций и перемещений исследуемого образца. Измерение деформаций производилось в трёх контрольных сечениях: среднем и двух крайних, расположенных на расстоянии 100 мм от торцов образца. Для проведения измерений применялись тензометрические датчики, соответствующие ГОСТ 21616 [45]. В работе использовались фольговые тензорезисторы типа ТКФО 5-120 и FLA- 10-11 со следующими характеристиками: измерительная база – 5 мм (ТКФО 5-120) и 10 мм (FLAB-10-11); номинальное электрическое сопротивление – 120 Ом; коэффициент тензочувствительности – 2.08. Схема расположения (см. рисунок 4.4) предполагала установку по четыре датчика в каждом сечения.

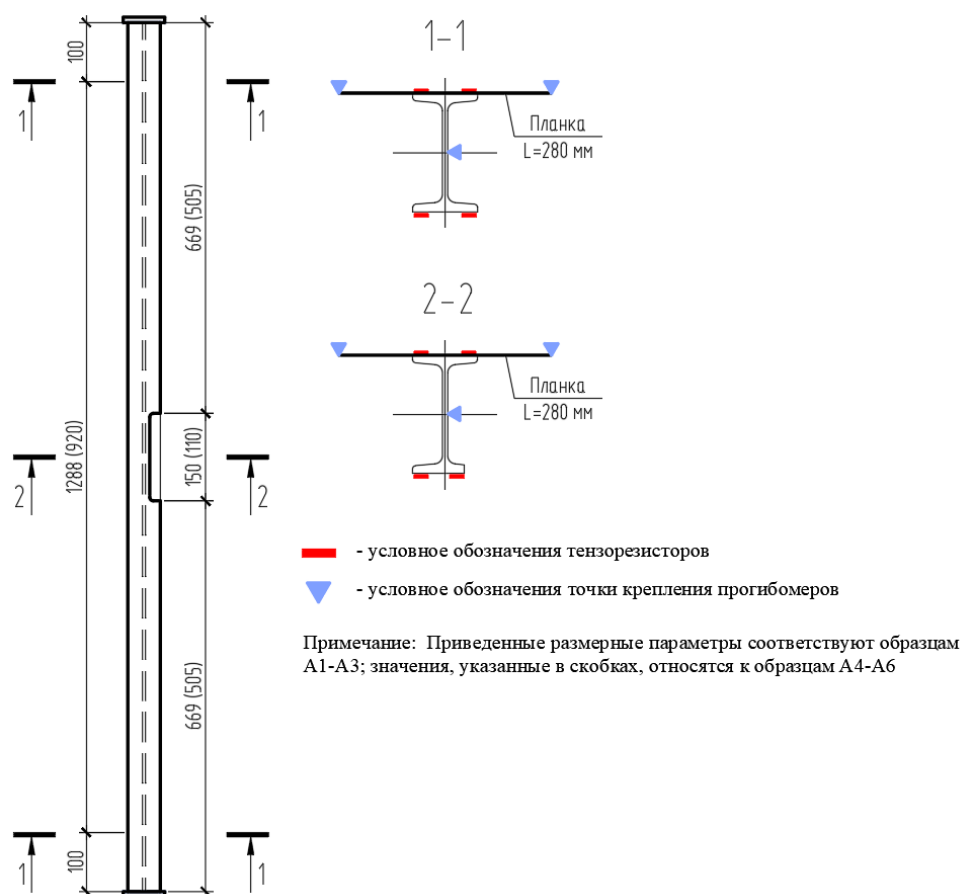


Рисунок 4.4 Схема установки тензодатчиков и прогибомеров

Участки для установки тензорезисторов подвергались последовательной подготовке, заключающейся в тщательной механической очистке и последующем обезжиривании поверхности. Крепление тензометрических датчиков к поверхности опытных образцов осуществлялось посредством цианоакрилатного клея мгновенной фиксации «Cosmo CA-500.200». Регистрация показаний тензорезисторов производилась с использованием тридцатиканальной тензометрической станции TDS-530, обеспечивающей автоматическую обработку и архивацию получаемой информации в выходные файлы. Перед началом экспериментальных исследований все тензорезисторы были оттарированы с использованием эталонной тарировочной балки.

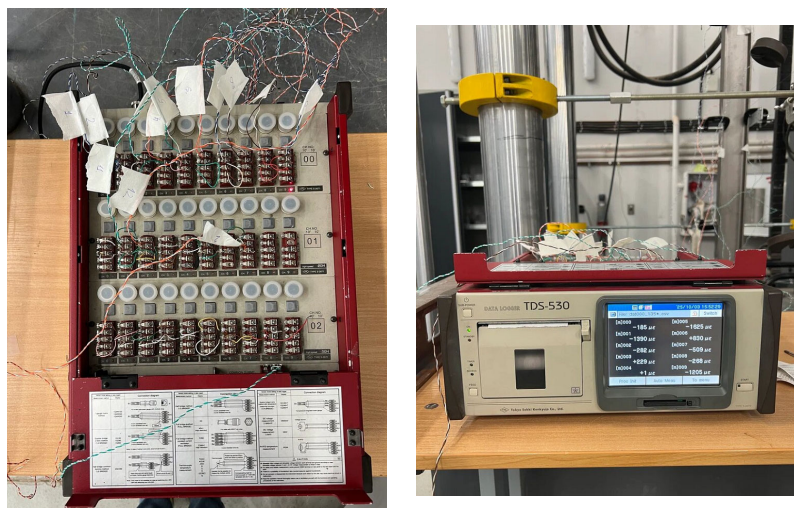


Рисунок 4.5 Тензометрическая станция TDS-530

Измерения перемещений вдоль главных осей в двух плоскостях выполнялись с использованием прогибомеров ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм. Схема размещения измерительных приборов приведена на рисунке 4.4.

В плоскости меньшей жёсткости в каждом из трёх контрольных сечений устанавливался один прогибомер. Приборы крепились к шпилькам, зафиксированным на стойках прессы. С целью измерения углов закручивания θ и перемещений в плоскости наибольшей жёсткости v в контрольных точках (среднем и опорных сечений) к полке стержня крепились жёсткие направляющие планки длиной 280 мм. Фиксация планок осуществлялась струбцинами, при этом строго контролировалось совпадение поперечной оси планки с продольной осью испытуемого стержня. Измерение перемещений концевых участков планок выполнялось прогибомерами, а расчет основных величин производился по разности показаний в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.6 по формулам:

$$v = \frac{(a+b)}{2} \quad (4.1)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{(b-a)}{280}\right) \quad (4.2)$$

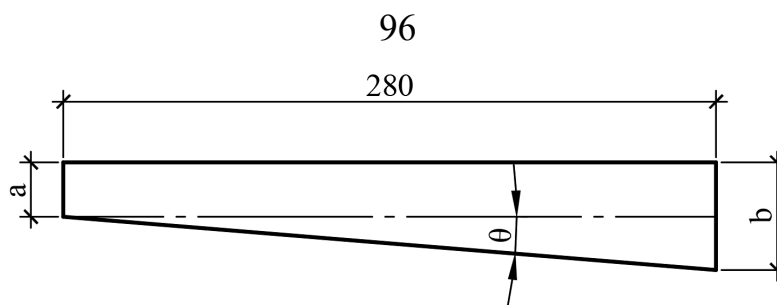


Рисунок 4.6 Схема к определению перемещений в плоскости большей жесткости и углов закручивания

4.6 Методика проведения экспериментального исследования

Методика испытаний стальных стержней на сжатие с двухосным эксцентриситетом состояло из трех последовательных этапов: подготовительный этап; этап нагружения опытных образцов; этап обработки полученных данных и их верификации путем сравнения с теоретическими значениями.

На подготовительном этапе проводилось:

1. Изготовление опытных образцов
2. Транспортировка образцов для испытаний в научную лабораторию
3. Разметка контрольных сечений стержня (среднее и опорные), для последующего крепления тензорезисторов и прогибомеров
4. Нанесение главных осей сечения стержня на опорные плиты с целью задания эксцентриситетов приложения сжимающей силы
5. Наклеивание тензорезисторов в количестве четырёх штук в каждом из контролируемых сечений: среднем и двух опорных (см. рисунок 4.4)
6. Фиксация фактических геометрических параметров для определения начальных искривлений в двух главных плоскостях
7. Монтаж образца в испытательную машину Newtons 1000 и выставление заданных эксцентриситетов
8. Подключение выводов тензорезисторов к тензостанции TDS-530 при помощи проводов
9. Крепление прогибомеров (см. рисунок 4.4)

Измерительные приборы, установленные в опорных сечениях, служили для контроля соответствия граничных условий принятой расчетной модели и регистрации возможных нерасчетных перемещений (люфтов). Прогибомеры были вынесены на значительное расстояние от опытного образца, что позволило исключить погрешность измерений, вызванную перемещениями в перпендикулярном направлении.

После проведения этапа по подготовки образца выполнялась проверка корректности работы измерительных приборов. В рамках данной процедуры выполнялась серия из трех циклов «нагрузка-разгрузка» образца усилием 10 кН. Это позволяло, во-первых, вывести прогибомеры в рабочий режим и обеспечить стабильность их показаний, а во-вторых, проверить корректность монтажа и функционирования тензорезисторов. Переход к основному этапу испытаний осуществлялся только после получения подтверждения о надежной работе всех измерительных приборов.

На этапе нагружения проводилось:

1. Регистрация начальных (нулевых) показаний измерительных приборов
2. Нагружение образца ступенями и снятие показаний со всех измерительных приборов, контроль прикладываемого усилия выполнялось штатным датчиком давления испытательного пресса. Величина каждой ступени нагрузки определялась на основании теоретических расчетов и снижалась по мере роста пластических деформаций стержня
3. Регистрация предельной нагрузки
4. Демонтаж образца из испытательной машины Newtons 1000

На последнем этапе экспериментальных исследований проводилось:

1. Обработка полученных данных
2. Выполнялся сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных. Результаты данного сопоставления представлены в п. 4.7 настоящей главы



Рисунок 4.7 Образец в испытательной машине Newtons 1000 готовый к испытаниям

4.7 Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических исследований

Ряд экспериментальных стержней имел начальные искривления в двух плоскостях в пределах (0,5-2 мм). Данные несовершенства были учтены в расчете по предложенной методике в главе 3. Стоит отметить, что для сравнения экспериментальных данных с теоретическими в расчет принималась фактическая расчетная длина образца, которая равняется расстоянию между опорными ребрами ножевых шарниров (длина образца плюс 160 мм), что соответствует полной волне синусоиды. Критерием достижения предельного состояния образца (потери устойчивости) являлось интенсивное нарастание перемещений при незначительном увеличении нагрузки. Дальнейшие попытки увеличения нагрузки сопровождались падением продольной силы, фиксируемый по показаниям оборудования пресса.

На рисунках 4.8-4.13 представлены графики «нагрузка-перемещение» для стержней, имеющих условную гибкость в плоскости меньшей жёсткости $\bar{\lambda}_y = 4,13$ и $\bar{\lambda}_y = 5,31$ с вырезом (схему расположения см. таблицу 4.2) в наиболее нагруженном сечении, отражающие перемещения в плоскостях меньшей (u) и большей (v) жёсткостях, а также углов закручивания сечения θ . Сплошные линии соответствуют результатам экспериментальных, пунктирные – теоретических исследований, а штрихпунктирные – без повреждений.

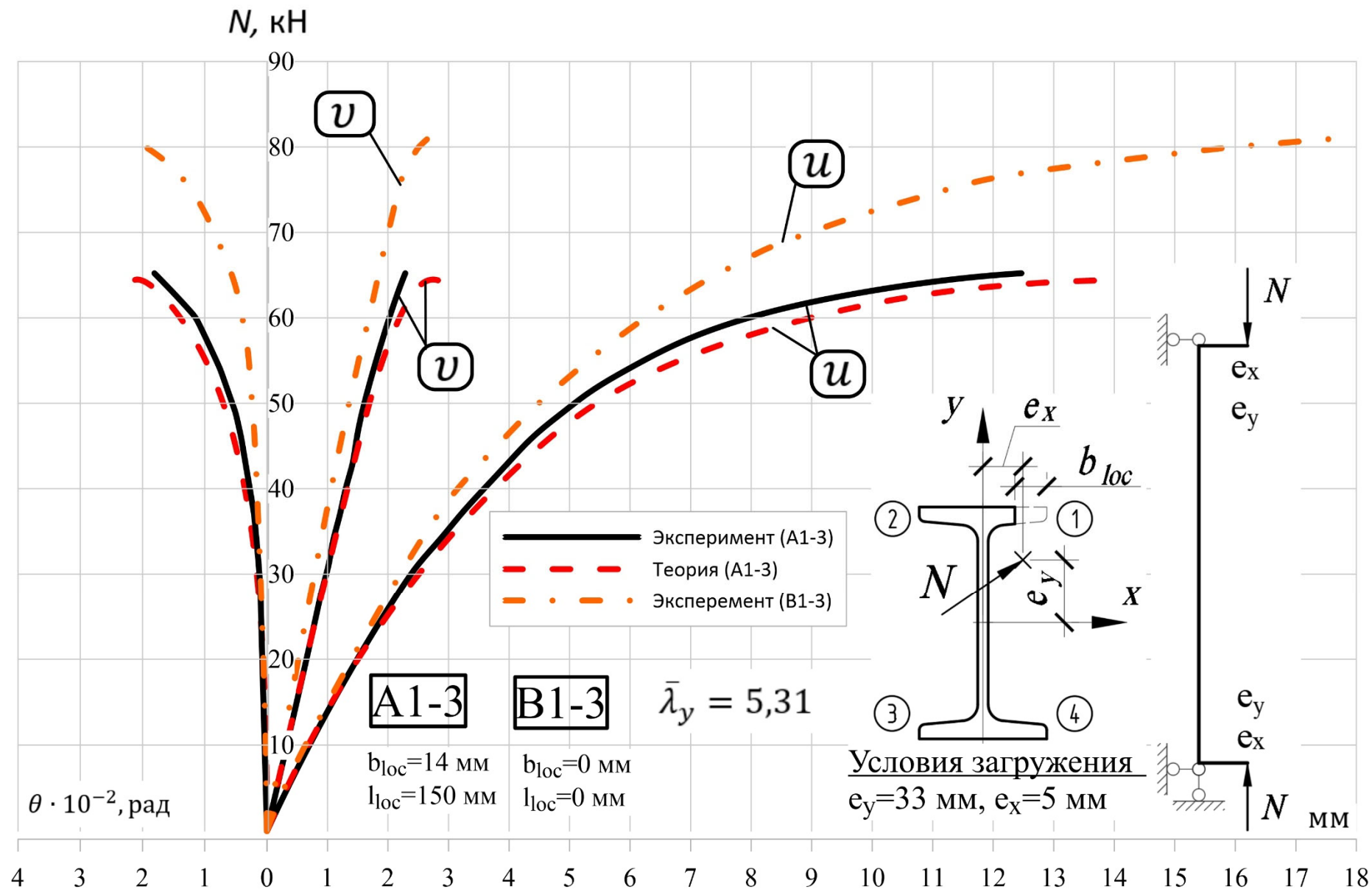


Рисунок 4.8 Зависимость углов закручивания (θ) и перемещений (u, v) экспериментальных образцов от величины продольной силы в случае расположения локального выреза в 1-й зоне

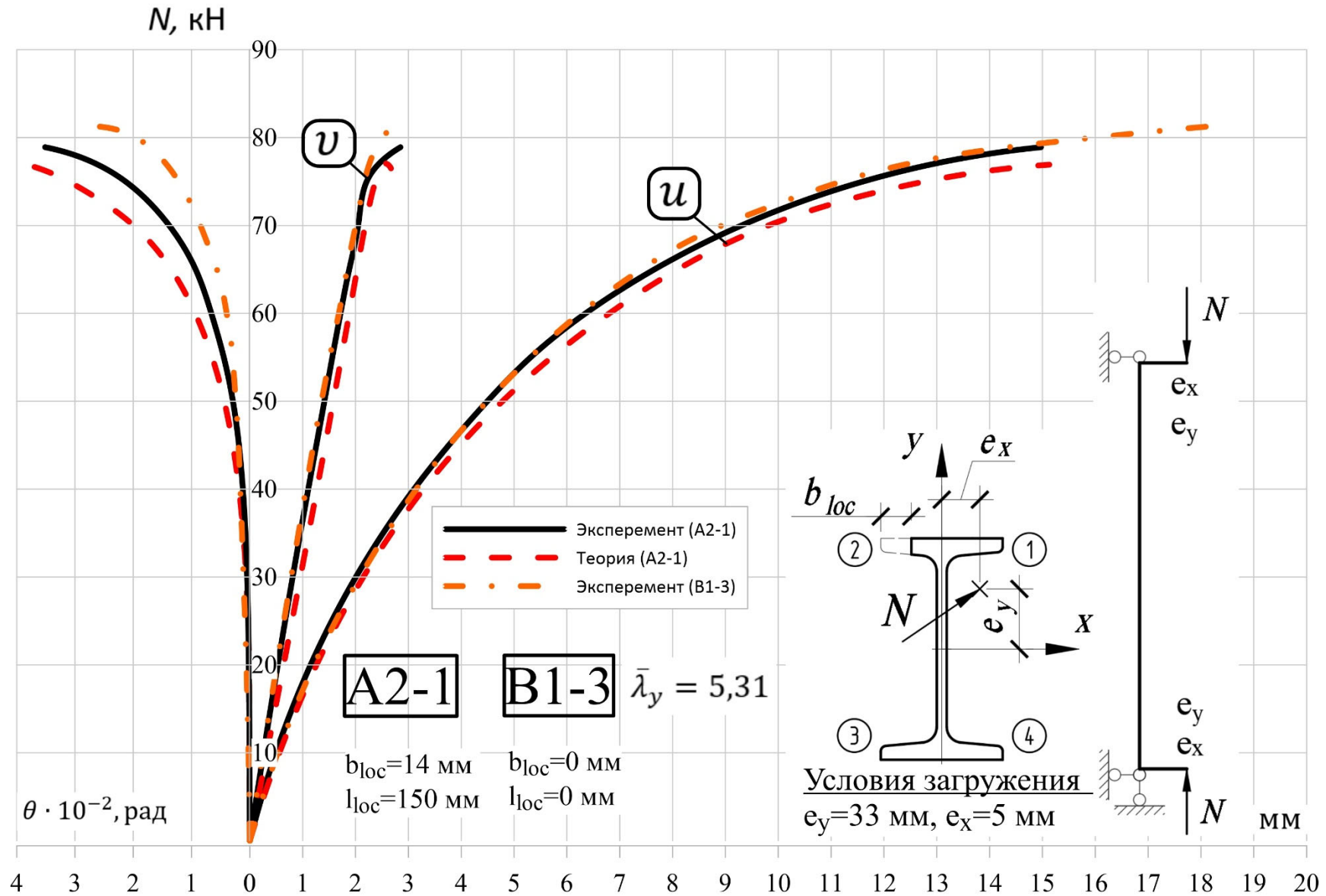


Рисунок 4.9 Зависимость углов закручивания (θ) и перемещений (u, v) экспериментальных образцов от величины продольной силы в случае расположения локального выреза в 2-й зоне

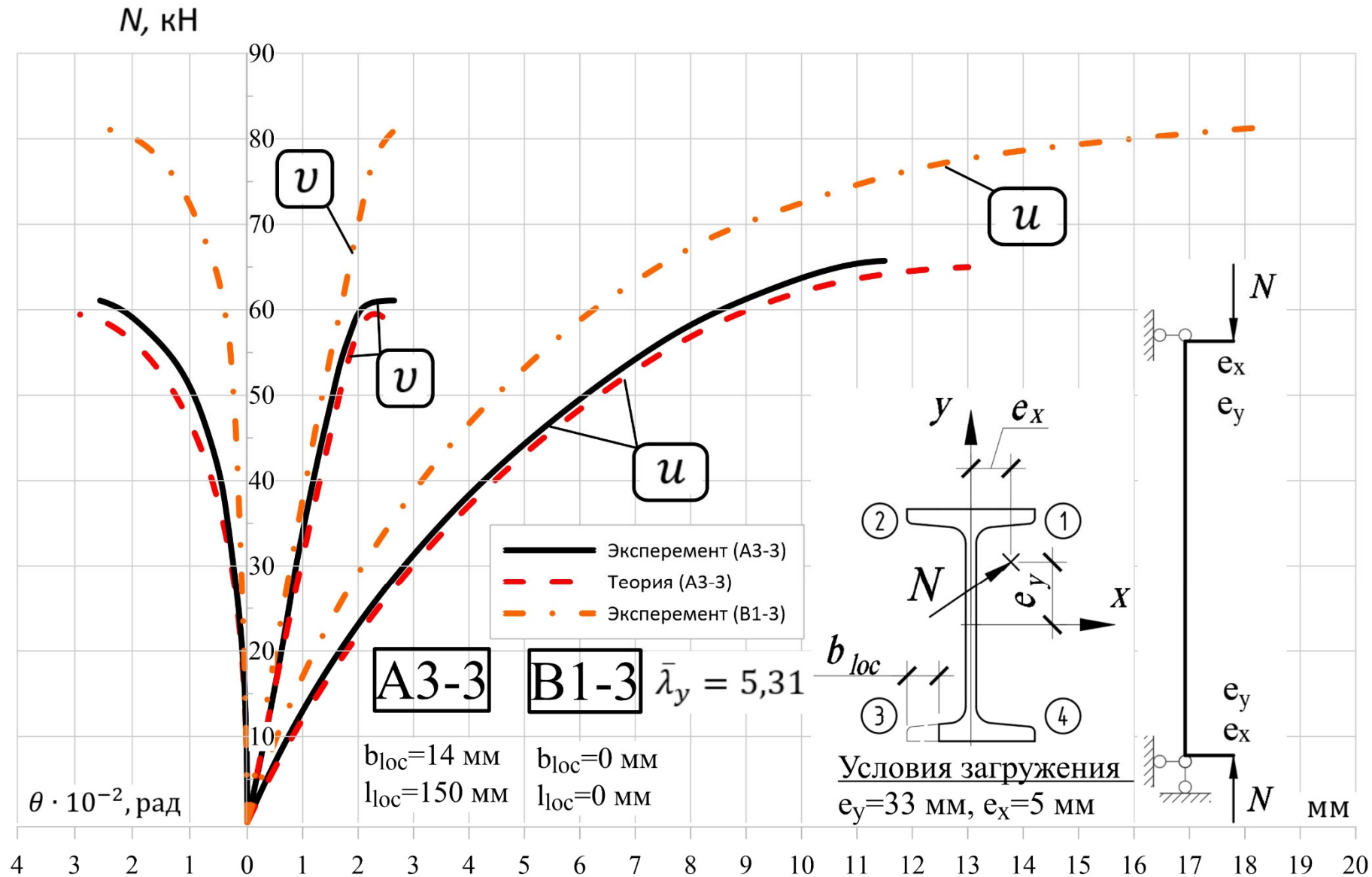


Рисунок 4.10 Зависимость углов закручивания (θ) и перемещений (u, v) экспериментальных образцов от величины продольной силы в случае расположения локального выреза в 3-й зоне

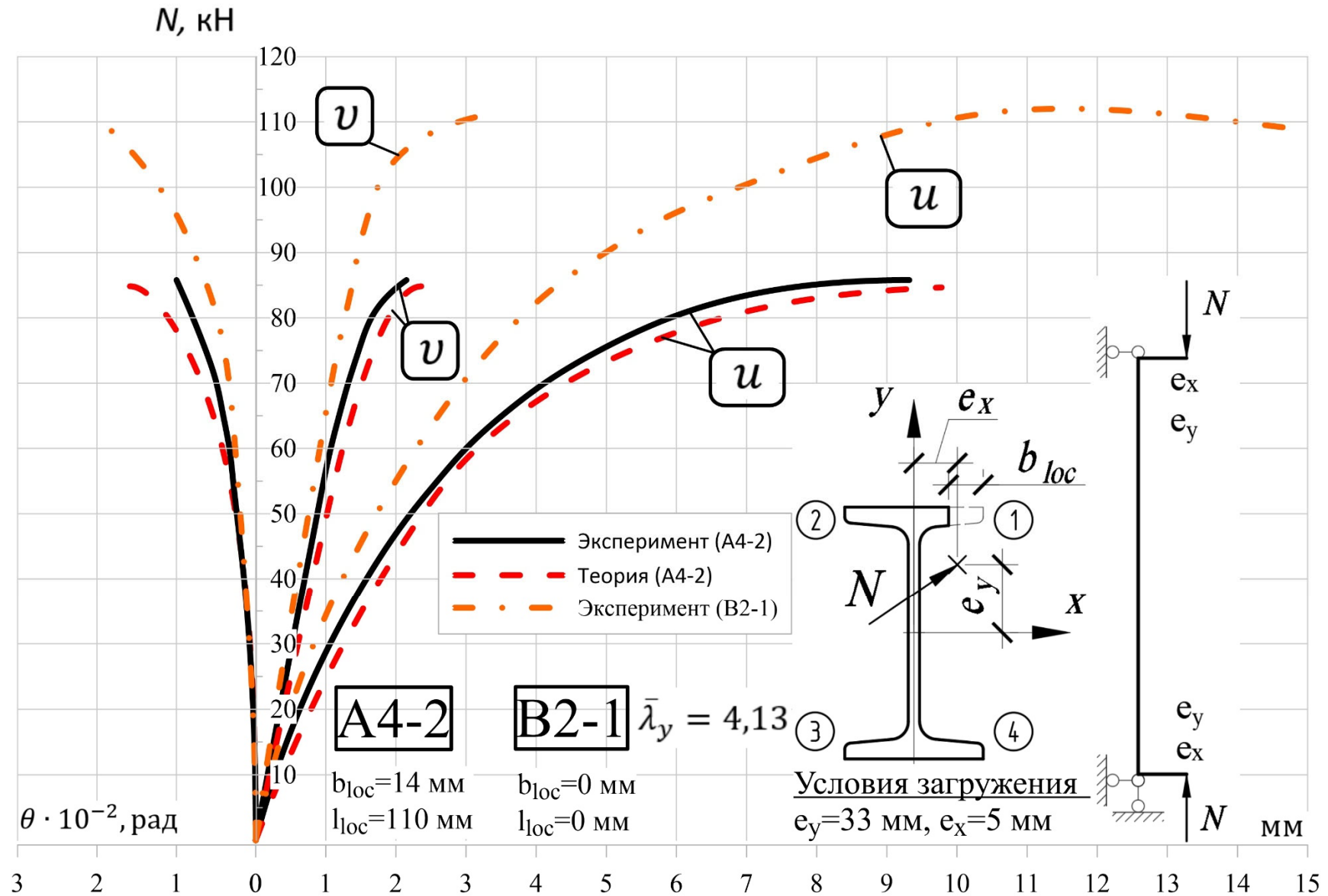


Рисунок 4.11 Зависимость углов закручивания (θ) и перемещений (u, v) экспериментальных образцов от величины продольной силы в случае расположения локального выреза в 1-й зоне

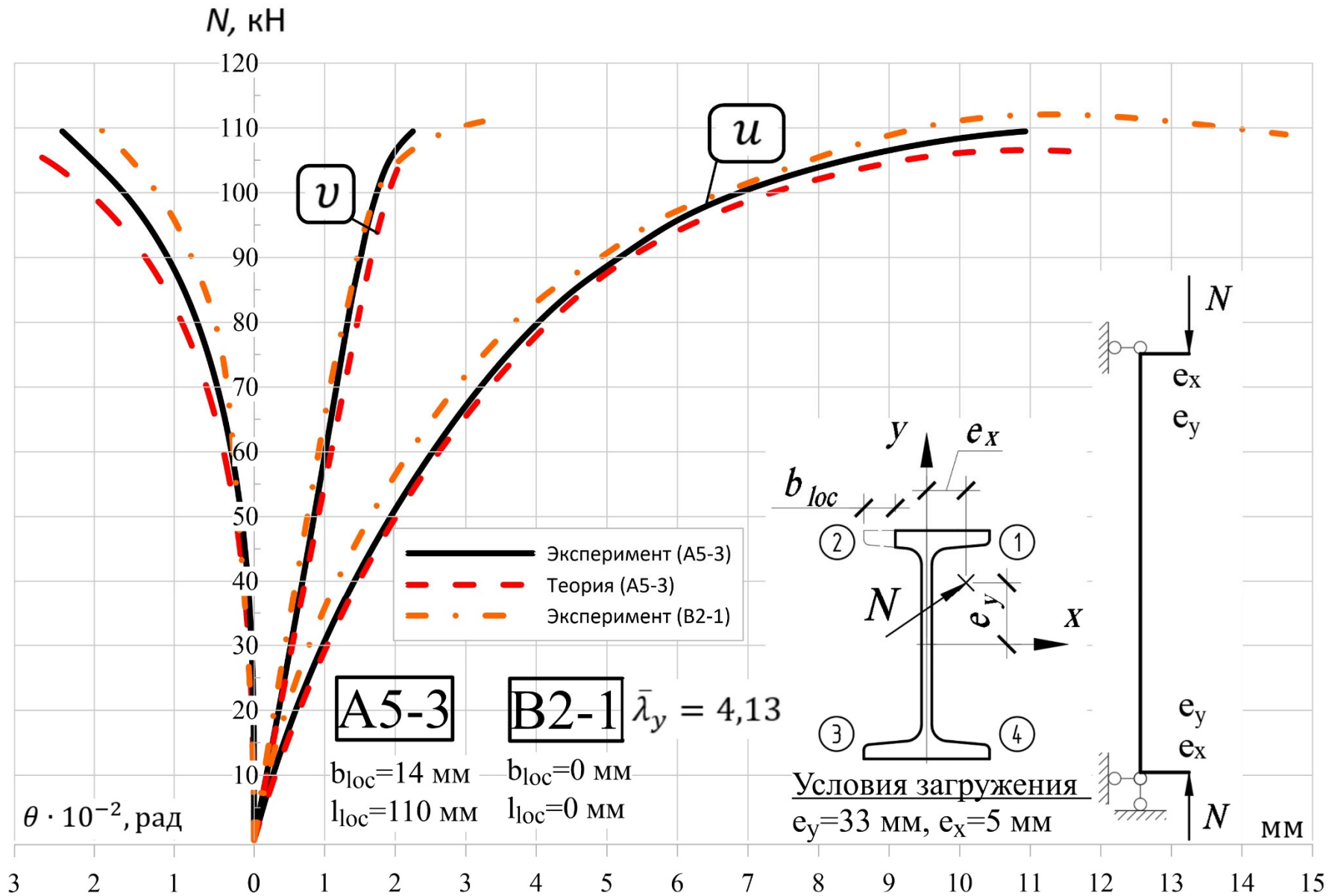


Рисунок 4.12 Зависимость углов закручивания (θ) и перемещений (u, v) экспериментальных образцов от величины продольной силы в случае расположения локального выреза в 2-й зоне

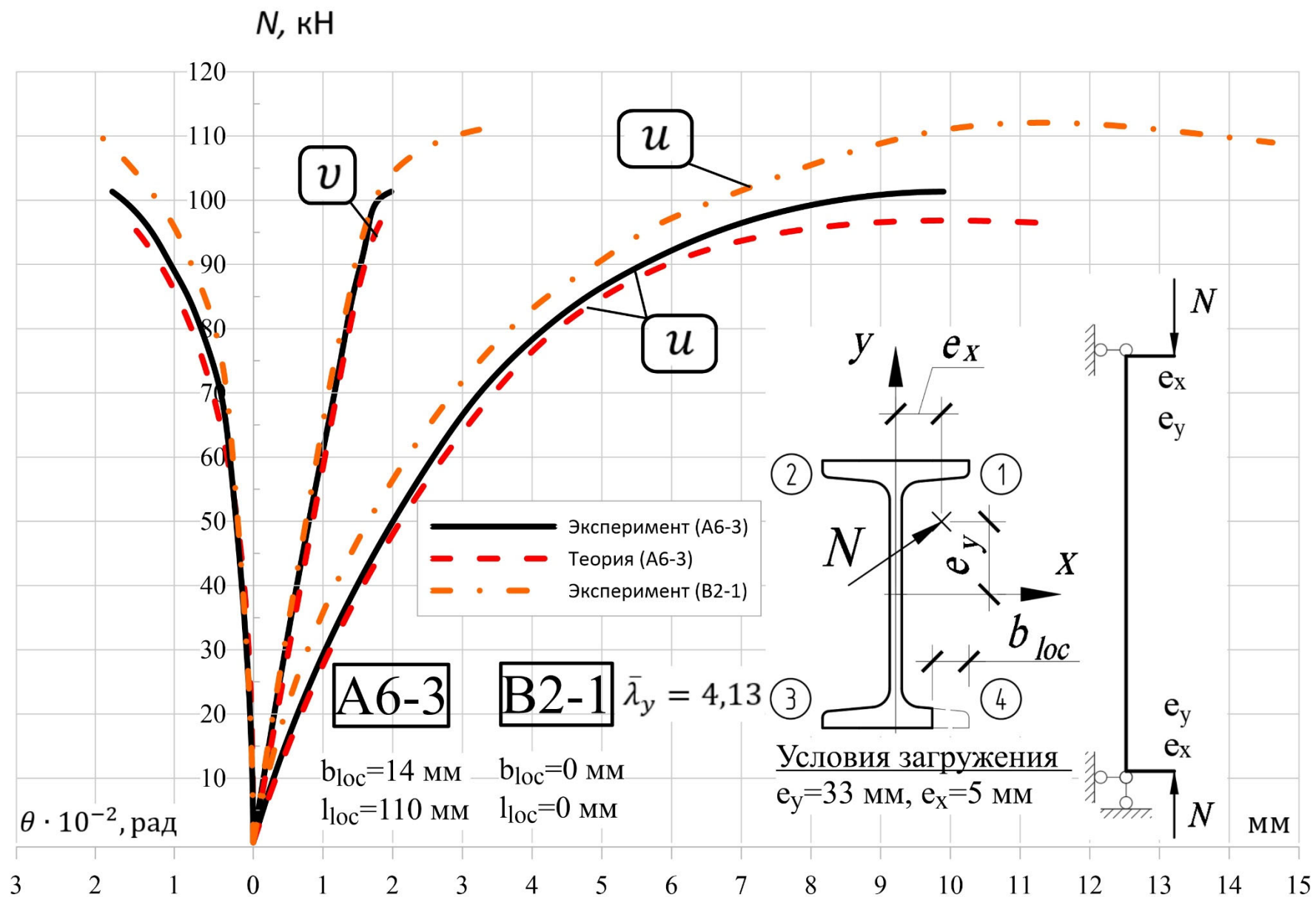


Рисунок 4.13 Зависимость углов закручивания (θ) и перемещений (u, v) экспериментальных образцов от величины продольной силы в случае расположения локального выреза в 4-й зоне

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Краевое повреждение оказывает существенное влияние на характер пространственного деформирования и величину предельной нагрузки внецентренно сжатого стержня. При расположении локального ослабления в виде выреза в наиболее напряженных зонах 1 и 3 (см. рисунки 4.8, 4.10 и 4.11), происходит интенсивное нарастание перемещений из плоскости меньшей жесткости u и угла закручивания сечения θ , что указывает на потерю устойчивости, которая происходит преимущественно по изгибно-крутильной форме. В случае расположения выреза в менее напряженных зонах 2 и 4 (см. рисунки 4.9, 4.12 и 4.13) картина деформирования изменяется незначительно относительно неповрежденного элемента.

В таблице 4.4 приведены значения предельных сил в зависимости от места расположения повреждения в сечении образца, а также неповрежденных элементов, из которой следует, что краевой вырез оказывает различное влияние на устойчивость. При расположении повреждения в наиболее нагруженной зоне (см. зону 1 на рисунке 4.8) у образцов А1 и А4 устойчивость снижается в пределах от 20,9% до 23,8% в зависимости от условной гибкости элемента (меньшее значение относится к большей гибкости), что в 2,2-2,6 раза больше площади ослабления. В случае расположения в менее нагруженной зоне (см. зону 2 на рисунке 4.9) у образцов А2 и А5 снижение устойчивости составляет от 1,3% до 2,4%, что практически не оказывает влияние на устойчивость. При расположении выреза на противоположной полке относительно действующей продольной силы (см. зоны 3 и 4 на рисунке 4.13) устойчивость образцов А3 и А6 снижается на 10,3% и 19,0% соответственно, что в 1,1 и 2,0 раза превышает площадь краевого выреза.

Таблица 4.4 Значения предельных сил поврежденных и неповрежденных образцов

Серия Схема повреждения	$\bar{\lambda}_y$	$N_{\text{эксп}}, \text{кН}$	$\frac{N_{\text{эксп}}^{\text{B1-B2}} - N_{\text{эксп}}^{\text{A1-A6}}}{N_{\text{эксп}}^{\text{B1-B2}}}, \%$	$N_{\text{теор}}, \text{кН}$	$\frac{N_{\text{эксп}} - N_{\text{теор}}}{N_{\text{эксп}}}, \%$
$\frac{\text{A1}}{1}$	5,31	64,344	20,9	63,281	1,65
		64,109	20,3	62,044	3,22
		65,223	19,6	64,471	1,15
$\frac{\text{A2}}{2}$	5,31	78,908	3,0	77,282	2,06
		79,056	1,7	77,433	2,05
		79,183	2,4	78,796	0,49
$\frac{\text{A3}}{3}$	5,31	66,493	18,2	65,285	1,85
		68,937	14,3	67,374	2,32
		65,724	19,0	64,983	1,14
$\frac{\text{A4}}{1}$	4,13	84,525	23,8	82,043	2,94
		85,782	21,7	84,832	1,11
		84,468	22,9	83,333	1,34
$\frac{\text{A5}}{2}$	4,13	108,125	2,6	105,627	2,31
		108,187	1,3	105,946	2,07
		108,468	1,0	106,530	1,79
$\frac{\text{A6}}{4}$	4,13	99,502	10,3	94,606	4,92
		101,284	7,6	96,701	4,52
		101,341	7,5	96,812	4,47
B1	5,31	81,314	-	80,268	1,29
		80,445	-	78,818	2,02
		81,123	-	79,919	1,48
B2	4,13	110,987	-	109,779	1,09
		109,587	-	107,231	2,15
		109,528	-	106,838	2,46

4.8 Вывод по главе

1. Экспериментально исследовано влияния локального повреждения в виде выреза на устойчивость двутаврового элемента. При расположении его в наиболее напряженной зоне сечения устойчивость снижается в несколько раз больше относительно площади ослабления. Так при ослаблении на 9,3%, общая устойчивость снижается на 23,8%. Если ослабление оказывается в менее напряжённой зоне, приводящее к смещению центра тяжести сечения, уменьшающего общий эксцентриситет продольной силы, то при малых эксцентриситетах снижение устойчивости практически не происходит.

2. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений предельных сил, определяющих потерю устойчивости, показал их хорошую сходимость. Максимальное отличие экспериментальных данных от теоретических не превысило 4,92%, что свидетельствует о достоверности разработанного метода расчета.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

1. «Обратные» численный и численно-аналитический методы адаптированы на расчет прочности и общей устойчивости сплошностенчатых элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями, что позволило получить новые данные о особенностях напряженно-деформированных и предельных состояний при общем нагружении.

2. Для унификации решения параметры механических (погнутости, вырывы, истирания) и коррозионных повреждений, вызывающих потерю местной устойчивости, приведены к эквивалентному ослаблению сечения в виде вырезов.

3. Выявлено весьма существенное влияние места расположения повреждения в сечении и направления начального искривления оси на несущую способность эксплуатируемых стальных элементов. При использовании расчетных комбинаций усилий, определяемых как для неповрежденных элементов одна и та же величина дефекта или повреждения может приводить элемент конструкции к работоспособному, ограничено- или неработоспособному состояниям. Все зависит от места его расположения относительно вектора действующих расчетных усилий. Отсюда следует, что проверку прочности и общей устойчивости следует проводить по специальной комбинации расчетных усилий, составленной применительно к месту расположения повреждения или направления искривления оси элемента.

4. Результаты расчетов прочности и устойчивости, выполненные с использованием предложенного метода и метода конечных элементов, продемонстрировали хорошую степень согласованности результатов, что свидетельствует о достоверности разработанного расчётного метода.

5. Экспериментально изучено влияние локального повреждения в виде краевого выреза на устойчивость внецентренно сжатого с двухосным эксцентриситетом двутаврового элемента. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений предельных сил, определяющих потерю устойчивости, показал их хорошую сходимость, что свидетельствует о достоверности разработанного метода расчета.

6. На основании проведенных исследований, предложен гармонизированный с СП 16.13330.2017 практический метод расчета несущей способности элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асташкин, М.В. Напряженно-деформированные и предельные состояния в сечениях стержневых элементов стальных конструкций при общем случае статического нагружения: дис. ... канд. техн. наук. / Максим Викторович Асташкин. – СПб., 2003. – 130 с.
2. Балдин, В.А. К вопросу дальнейшего совершенствования метода расчета строительных конструкций по предельным состояниям.// Развитие методики расчета по предельным состояниям. / Балдин. – М.: Стройиздат, 1971. – 63–70 с.
3. Бейлин, Е.А. Общее уравнение деформационного расчета и устойчивость тонкостенных стержней / Е.А. Бейлин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1969. – № 5 – С. 35–41.
4. Бейлин, Е.А. К теории деформационного расчета и устойчивости криволинейных и прямолинейных тонкостенных стержней / Е.А. Бейлин // Механика стержневых систем и сплошных сред. – 1970. – С. 9–19.
5. Беленя, Е.И. Металлические конструкции / Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат: : Учебник для инж.-строит. вузов фак. пром. и гражд. стр.-ва., 1985. – 560 с.
6. Белый, Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме / Г.И. Белый // Строит. механика и расчет сооружений. – 1983. – С. 40–48.
7. Белый, Г.И. О расчете упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформированной схеме с учетом касательных напряжений и деформации сдвига / Г.И. Белый // Металлические конструкции и испытания сооружений. – 1985. – С. 10–23.
8. Белый, Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. / Григорий Иванович Белый. – Л., 1987. – 358 с.
9. Белый, Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений / Г.И. Белый // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6 (83) – С. 46–55 – DOI:10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55.
10. Белый, Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений / Г.И. Белый // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6 (83) – С. 46–55 – DOI:10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55.
11. Белый, Г.И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении / Г.И. Белый // Вестник

гражданских инженеров. – 2020. – № 3 (80) – С. 43–54 – DOI:10.23968/1999-5571-2020-17-3-43-54.

12. Белый, Г.И. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом / Г.И. Белый, А.А. Ведерникова // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2 (85) – С. 26–35 – DOI:10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35.

13. Белый, Г.И. Обратный численно-аналитический метод расчета легких стальных тонкостенных стержневых элементов / Г.И. Белый, М.О. Смирнов // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 3 – С. 57–68 – DOI:10.33622/0869-7019.2021.03.57-68.

14. Белый, Г.И. Запредельные напряженно-деформированные состояния в поперечных сечениях элементов стальных конструкций / Г.И. Белый, А.И. Гарипов // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 4 (93) – С. 16–30 – DOI:10.23968/1999-5571-2022-19-4-16-30.

15. Белый, Г.И. Запредельная несущая способность стержневых элементов стальных конструкций после потери общей устойчивости / Г.И. Белый, А.И. Гарипов // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 5 (94) – С. 5–19 – DOI:10.23968/1999-5571-2022-19-5-5-19.

16. Белый, Г.И. Развитие практического метода расчета элементов стальных конструкций на прочность / Г.И. Белый. – 2023. – Т. 4 – № 99 – С. 20–31 – DOI:10.23968/1999-5571-2023-20-4-20-31.

17. Белый, Г.И. Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций / Г.И. Белый, Е.А. Матвеев // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 544-556. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556. – EDN ETLKII.

18. Белый, Г.И. К расчету устойчивости элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями / Г.И. Белый // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 3 (104) – С. 25–35 – DOI:10.23968/1999-5571-2024-21-3-25-35.

19. Белый, Г.И. Практический метод расчета прочности стальных элементов двутаврового и коробчатого сечений / Г.И. Белый, А.И. Гарипов // Промышленное и гражданское строительство. – 2026. – № 5 – С. 92–99 – DOI:10.23968/1999-5571-2022-19-5-5-19.

20. Белый, Г.И. Влияние повреждений на устойчивость элементов стальных конструкций по изгибно-крутильной форме / Г.И. Белый, Е.А. Матвеев // Вестник Гражданских Инженеров. – 2026. – № 2 (115) – С. 27–36 – DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-2-27-36. – EDN LNAXKU.

21. Бельский, Г.Е. Устойчивость сжатых стальных стержней с упругими защемлениями концов / Г.Е. Бельский // Науч. сообщ. ЦНИИСК Акад. стр-ва и архитектуры СССР. – 1959. – № 10 – С. 148.

22. Бельский, Г.Е. Об устойчивости сжато-изогнутых стержней с учетом продольного сближения опор / Г.Е. Бельский // Строит. механика и расчет сооружений. – 1971. – № 1 – С. 38–44.
23. Бельский, Г.Е. О предельных состояниях элементов металлических конструкций при сжатии (растяжении) с изгибом / Г.Е. Бельский // Строит. механика и расчет сооружений. – 1973. – № 2 – С. 51–57.
24. Бельский, Г.Е. О количественных критериях предельных состояний по непригодности к эксплуатации / Г.Е. Бельский // Строит. механика и расчет сооружений. – 1978. – № 2 – С. 15–20.
25. Бельский, Г.Е. Конференция по предельным состояниям металлических строительных конструкций / Г.Е. Бельский // Строит. механика и расчет сооружений. – 1982. – № 4 – С. 3–4.
26. Броуде, Б.М. О линеаризации уравнений устойчивости внецентренно-сжатого стержня / Б.М. Броуде // Исследования по теории сооружений. – 1959. – № 8 – С. 205–223.
27. Броуде, Б.М. Об устойчивости стержней, сжатых с двухосными эксцентриситетами / Б.М. Броуде // Расчёт пространственных конструкций. – 1959. – № 5 – С. 37–50.
28. Броуде, Б.М. К теории тонкостенных стержней открытого профиля / Б.М. Броуде // Строит. механика и расчет сооружений. – 1960. – № 5 – С. 6–11.
29. Броуде, Б.М. К теории тонкостенных стержней открытого профиля / Б.М. Броуде // Строительная механика и расчет сооружений. – 1960. – С. 6–11.
30. Ведяков, И.И. Обследование высотной части павильона «Космос» в городе Москве / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, М.И. Фарфель, Д.Ю. Коняшин, О.В. Кашин // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – С. 30–40.
31. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / Власов. – М.: Физматгиз, 1959. – 566 с.
32. Воробьев, Л.Н. Деформационный расчет и устойчивость тонкостенных стержней открытого профиля / Л.Н. Воробьев // тр. / Новочерк. политехн. ин-т. – 1958. – № 69–63 – С. 3–48.
33. Воронцов, Г.В. Малые пространственные колебания, устойчивость и устойчивая прочность тонкостенных стержней открытого профиля / Г.В. Воронцов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1965. – № 1 – С. 44–49.
34. Вязьменский, С.П. О пространственной деформации гибких тонкостенных стержней / С.П. Вязьменский // Ленинград. инж. строит. ин-т. – 1957. – № 26 – С. 270–313.

35. Вязьменский, С.П. О граничных условиях в теории тонкостенных стержней / С.П. Вязьменский // Механика стержневых систем и сплошных сред. – 1966. – № 60 – С. 20–29.
36. Вязьменский, С.П. Приближенное решение задачи о расчете прямолинейных упругих стержней по деформированному состоянию / С.П. Вязьменский // Механика стержневых систем и сплошных сред. – 1966. – № 49 – С. 268–285.
37. Геммерлинг, А.В. Устойчивость открытых профилей при внецентренном сжатии / А.В. Геммерлинг // Сборник задач по расчету тонкостенных конструкций. – 1941. – С. 120–151.
38. Геммерлинг, А.В. Несущая способность сжатых и сжатоизогнутых элементов стальных конструкций / А.В. Геммерлинг // Сборник задач по расчету тонкостенных конструкций. – 1950. – С. 5–69.
39. Геммерлинг, А.В. Несущая способность стальных стержневых конструкций / А.В. Геммерлинг. – М.: Госстройиздат, 1958. – 216 с.
40. Геммерлинг, А.В. Расчетные критерии предельных состояний / А.В. Геммерлинг // Строит. механика и расчет сооружений. – 1969. – № 2 – С. 1–4.
41. Геммерлинг, А.В. Расчет стержневых систем / А.В. Геммерлинг. – М.: Стройиздат, 1974. – 208 с.
42. ГОСТ 535-2005 Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с.
43. ГОСТ 1497-2023 Металлы. Методы испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2024. – 40 с.
44. ГОСТ 7564-97 Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний. – Миснк: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 12 с.
45. ГОСТ 21616-91 Тензорезисторы. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 48 с.
46. ГОСТ 27772-2021 Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017. – 26 с.
47. ГОСТ 35087-2024 Двутавры стальные горячекатаные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2024. – 40 с.
48. ДБН 362-92 Оценка технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных зданий и сооружений-. – Киев.: Укрархстройинформ, 1993. – 37 с.
49. Енжиевский, Л.В. Истории аварий и катастроф / Л.В. Енжиевский, А.В. Тершкова. – Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2013. – 440 с.

50. Зарифьян, А.З. К вопросу о деформационном расчете внецентренно-сжатых тонкостенных стержней открытого профиля / А.З. Зарифьян // Тр. / Новочерк. политехн. ин-т. – 1968. – № 49 – С. 27–34.

51. Зарифьян, А.З. Расчет по деформированной схеме и определение несущей способности тонкостенных стержней открытого профиля / А.З. Зарифьян // Прочность, устойчивость и колебания инженерных конструкций. - Новочеркасск: НПИ. – 1974. – Т. 305 – С. 35–42.

52. Зарифьян, А.З. Деформационный расчет и определение несущей способности внецентренно сжатых тонкостенных стержней / А.З. Зарифьян, А.Н. Дудченко // Прочность, устойчивость и колебания инженерных конструкций. - Новочеркасск. – 1974. – Т. 305 – С. 51–57.

53. Ильяшенко, А.В. Задачи о закритическом состоянии сжатых тонкостенных стержней коробчатого профиля, имеющих начальную погибь / А.В. Ильяшенко // Строительные конструкции и материалы. – 1963. – С. 99–108.

54. Ильяшенко, А.В. Вариационное уравнение принципа возможных перемещений для сжатых гибких пластинок с упруго-защемленными продольными ненагруженными гранями, имеющих начальную погибь / А.В. Ильяшенко // Строит. механика и расчет сооружений. – 1983. – № 6 – С. 29–32.

55. Ильяшенко, А.В. Система разрешающих уравнений для описания послекритического состояния тавровых, уголкового и крестообразных профилей, обладающих начальной погибью / А.В. Ильяшенко // Научные исследования в области сейсмостойкости и динамики промышленных зданий и сооружений. – 1983. – С. 105–124.

56. Ильяшенко, А.В. Несущая способность тонкостенных стержней, обладающих начальными погибями при учете местной потери устойчивости: дис. ... канд. техн. наук. / Алла Викторовна Ильяшенко. – М., 1984. – 255 с.

57. Кацеф, Э.Б. Несущая способность сквозных решетчатых стоек с дефектами и повреждениями в виде ослабления поперечного сечения: дис. ... канд. техн. наук. / Эдита Борисовна Кацеф. – Лицевк, 1999. – 201 с.

58. Копейкин, Ю.Д. К расчету внецентренно сжатых тонкостенных стержней по теории В.З. Власова / Ю.Д. Копейкин // Прикладная механика. – 1957. – Т. 3 – № 2 – С. 169–178.

59. Корчак, М.Д. О влиянии местных начальных искривлений пояса на устойчивость решетчатого стержня / М.Д. Корчак // Совершенствование развития норм проектирования стальных строительных конструкций. – 1981. – С. 119–127.

60. Лакусса, К.С.Э. Прочность и пространственная устойчивость стержней из одиночных уголков, имеющих общие и местные дефекты и повреждения: дис. ... канд. техн. наук. / Камиль Самид Элиас Лакусса. – СПб., 1993. – 171 с.

61. Ларичев, П.Я. К расчету тонкостенных внецентренно сжатых стержней по деформированному состоянию / П.Я. Ларичев // Инженерные конструкции. – 1961. – С. 62–71.
62. Лащенко, М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М.Н. Лащенко. – Л.: Стройиздат, 1969. – 183 с.
63. Лащенко, М.Н. Повышение надежности металлических конструкций при реконструкции / М.Н. Лащенко. – Л.: Стройиздат, 1987. – 136 с.
64. Лейтес, С.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней / Лейтес. – М.: Госстройиздат, 1954. – 308 с.
65. Лейтес, С.Д. О пространственной устойчивости сжато- изогнутых стержней в упругопластической стадии / С.Д. Лейтес // Строит. механика и расчет сооружений. – 1961. – № 4 – С. 24–29.
66. Любовский, М.О. Совершенствование методов расчета устойчивости сквозных двухветвевых элементов стальных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Михаил Олегович Любовский. – СПб., 2025. – 22 с.
67. Любаров, Б.И. К расчету элементов стальных конструкций на прочность при наличии нормальных и касательных напряжений по критериям ограниченных пластических деформаций / Б.И. Любаров // Металлические конструкции и испытания сооружений. - Л. – 1984. – С. 37–45.
68. Любимов, Н.М. Влияние малых искривлений растянутых стержней на работу сварных ферм / Н.М. Любимов, Н.Т. Чернышев // Пром. стр.-во. – 1968. – № 3 – С. 31–32.
69. Мамин, А.Н. Реставрация водонапорной башни ниже-выксунского завода / А.Н. Мамин, Э.Н. Кодыш, М.Н. Ершов, В.В. Бобров, А.В. Рэуцу // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 1 (81) – С. 67–75 – DOI:10.33979/2073-7416-2019-81-1-67-75.
70. Матвеев, Е.А. Сравнительный анализ алгоритма "Сечение" и численного решения задачи прочности элементов стальных конструкций, имеющих дефекты и повреждения / Е.А. Матвеев // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 81-ой Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 15–19 апреля 2024 года. – Самара. – Самарский государственный технический университет, 2024. – С. 145–151. – EDN SMYWOD.
71. Матвеев, Е.А. Влияние дефектов и повреждений на устойчивость элементов стальных конструкций по изгибной форме / Е.А. Матвеев // Вестник Гражданских Инженеров. – 2024. – № 6 (107) – С. 52–60 – DOI:10.23968/1999-5571-2024-21-6-52-60. – EDN YZRLMO.
72. Матвеев, Е.А. Экспериментальные исследования влияния локального повреждения на устойчивость двутавровых элементов / Е.А. Матвеев // Известия

высших учебных заведений. Строительство. – 2026. – № 5 (809) – С. 137–145 – DOI:10.32683/0536-1052-2026-809-5-137-145. – EDN GYIGZT.

73. Михалев, Н.Я. О сохранении уникальных стальных конструкций светопрозрачного покрытия главпочтамта в г. Москве / Н.Я. Михалев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6 – С. 315–318.

74. Михаськин, В.В. Влияние сварочных процессов на пространственную устойчивость усиливаемых под нагрузкой элементов стержневых конструкций: дис. ... канд. техн. наук. / Владимир Владимирович Михаськин. – СПб., 2010. – 200 с.

75. Моисеев, В.И. Расчет устойчивости пластинок в металлических конструкциях за пределом упругости на основе принципа равноустойчивости стержня и элементов поперечного сечения: дис. ... д-ра техн. наук. / Виктор Иванович Моисеев. – М., 1988. – 378 с.

76. Мункуева, Е.М. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций крестового сечения, имеющих общие и местные дефекты и повреждения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Елена Мироновна Мункуева. – СПб., 1999. – 22 с.

77. Насонкин, В.Д. Прочность растянутого уголка, ослабленного отверстием для болта / В.Д. Насонкин // Металлические конструкции и испытания сооружений. - Л. – 1984. – С. 59–67.

78. Опланчук, А.А. Несущая способность стержней ферм из уголков с местными дефектами: дис. ... канд. техн. наук. / Александр Анатольевич Опланчук. – Новосибирск, 1983. – 241 с.

79. Опланчук, А.А. Несущая способность стальных ферм из уголков с местными дефектами / А.А. Опланчук, Г.М. Остриков, В.В. Бирюлев // Пром. строительство. – 1988. – № 12 – С. 15–16.

80. Пичугин, С.Н. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций из уголков, имеющие общие и местные дефекты и повреждения: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Сергей Нинелович Пичугин. – Л., 1987. – 25 с.

81. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). – М.: Стройиздат, 1989. – 159 с.

82. Потапкин, А.А. Теория и расчет стальных и сталежелезобетонных мостов на прочность с учетом нелинейных и пластических деформаций / А.А. Потапкин // Тр. / ЦНИИС. – 1972. – № 84 – С. 192.

83. Потапкин, А.А. Расчеты стальных мостов на прочность в упругопластической стадии / А.А. Потапкин // Конструкции, расчет и технологии изготовления стальных мостов. - М. – 1974. – № 90 – С. 60–78.

84. Пяткин, П.А. Прочность и пространственная устойчивость усиленных под нагрузкой стержневых элементов конструкций открытого сечения: дис. ... канд. техн. наук. / Павел Алексеевич Пяткин. – СПб., 2000. – 148 с.
85. Рекомендации по расчету элементов стальных конструкций на прочность по критерию ограниченных предельных пластических деформаций. – М., 1980. – 48 с.
86. Ржаницын, А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов / Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1954. – 287 с.
87. Ржаницын, А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. / А.Р. Ржаницын. – М.: Госстройиздат, 1955. – 475 с.
88. Ржаницын, А.Р. К вопросу о мгновенной жесткости сечения / А.Р. Ржаницын // Строит. механика и расчет сооружений. – 1966. – № 2 – С. 7–10.
89. Родиков, Н.Н. Устойчивость сжатых с двухосными эксцентриситетами стержневых элементов конструкций из открытых профилей: дис. ... канд. техн. наук. / Николай Николаевич Родиков. – Л., 1987. – 148 с.
90. Сахновский, М.М. Уроки аварий стальных конструкций / М.М. Сахновский, А.М. Титов. – Киев: Будивельник, 1969. – 200 с.
91. Сердюков, В.И. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций из одиночных уголков: дис. ... канд. техн. наук. / Владимир Иванович Сердюков. – М., 1982. – 155 с.
92. Сеницын, Ю.Н. Об оценке несущей способности сжатых стержней стропильных ферм с местными погибями полок уголков / Ю.Н. Сеницын // Куйбышевский инж.-строит.ин-т. – Куйбышев, 1981. – С. 17.
93. Смирнов, М.О. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей с фактически редуцированным сечением: дис. ... канд. техн. наук / Максим Олегович Смирнов. – СПб., 2022. – 157 с.
94. Сотников, Н.Г. Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций из уголков, имеющие общие и местные дефекты и повреждения: дис. ... канд. техн. наук. / Николай Георгиевич Сотников. – Л., 1987. – 157 с.
95. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. –. – введ. с 28.08.2017 – М., 2017. – 139 с.
96. СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования. –. – введ. с 01.12.2017 – М., 2017. – 164 с.
97. Стрелецкий, Н.С. К вопросу усиления экономического подхода в расчете конструкций (расчет конструкций по эксплуатационной способности) / Н.С. Стрелецкий // Строит, механика и расчет сооружений. – 1965. – № 2 – С. 1–4.
98. Стрелецкий, Н.С. К вопросу развития методики расчета по предельным состояниям / Н.С. Стрелецкий // Развитие методики расчета по предельным состояниям. - М. – 1971. – С. 5–37.

99. Тимошенко, С.П. Прочность и колебания элементов конструкций: Наука / С.П. Тимошенко. – М., 1975. – 704 с.
100. Титаков, А.И. Приближенная оценка величины погиби в металлических конструкциях / А.И. Титаков // Московский архитектурный институт. – 1978. – С. 10.
101. Хорошоженова, Э.П. Расчет несущей способности сжатых стержней открытого профиля, имеющих местные погибы полков / Э.П. Хорошоженова // Реф. информ. Проектирование металлических конструкций. – М.: ЦИНИС. Серия: 17. – 1977. – № 5 – С. 17–22.
102. Хэммонд, Р. Аварии зданий и сооружений / Р. Хэммонд. – М.: Стройиздат, 1960. – 188 с.
103. Чернов, Н.Л. Расчеты стальных конструкций на прочность по критериям ограниченных пластических деформаций / Н.Л. Чернов, Н.Н. Стрелецкий, Б.И. Любаров // Стр-во и архитектура. – 1984. – № 7 – С. 1–9.
104. Чижевский, А.Ю. О несущей способности ослабленных сжатых стержней / А.Ю. Чижевский // Применение ЭВМ в расчетах строительных конструкций. – Л. – 1982. – С. 66–71.
105. Чувикин, Г.М. Экспериментальное исследование плоской деформации двутавровых балок за пределом упругости / Г.М. Чувикин // Расчет пространственных конструкций. – 1958. – № 4 – С. 37–56.
106. Шепелев, Ю.Ю. Характерные дефекты и повреждения надшахтных металлических копров / Ю.Ю. Шепелев, Н.А. Кудрейко, Н.Н. Строев, М.В. Кривоноженков, А.С. Мельничук // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 2022. – Т. 1 – № 56 – С. 14–24.
107. Шкирнев, А.Н. Аварии на строительных объектах, их причины и способы предупреждения и ликвидации / А.Н. Шкирнев. – М.: Стройиздат, 1966. – 308 с.
108. Яровой, С.Н. Опыт Обследования Большепролетных Покровов Дворца Спорта В Харькове / С.Н. Яровой, Е.Ю. Дорофеев // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – С. 212–221.
109. Яровой, С.Н. Обследование металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен / С.Н. Яровой // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – С. 222–231.
110. Ao, L. Evaluation on the residual ultimate strength of stiffened plates with central dent under longitudinal thrust / L. Ao, H. Wu, D. Wang, W. Wu // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 202 – P. 107167 – DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.107167.

111. Ban, H.Y. Overall buckling behavior of 460 MPa high strength steel columns: experimental investigation and design method / H.Y. Ban, G. Shi, Y.J. Shi, Y.Q. Wang. – J. Constr. Steel Res, 2012. – № 74 – P. 140–150.
112. Birnstiel, C. Ultimate load of H-columns under biaxial bending / C. Birnstiel, I. Michalos // Journal of the Structural Division of the ASCE. – 1963. – Vol. 2 – № 89 – P. 161–197.
113. Chen, W.F. Santathadaporn. Review of column behavior under biaxial bending / W.F. Chen // Journal of the Structural Division of the ASCE. – 1968. – Vol. 12 – № 94 – P. 2999–3021.
114. Chen, W.F. Santathadaporn. Review of column behavior under biaxial bending / W.F. Chen, T. Atsuta // Journal of the Structural Division of the ASCE. – 1973. – Vol. 3 – № 99 – P. 469–489.
115. Cheney, L.T. Short steel columns progress report / L.T. Cheney. – Fritz Laboratory Reports, Paper 1222, Lehigh University. Lehigh, 1939. – P. 27.
116. Di Sarno, L. The Effect of Atmospheric Corrosion on Steel Structures / L. Di Sarno, A. Majidian, G. Karagiannakis // A State-of-the-Art and Case-Study. Buildings. – 2021. – № 11 (12) – P. 571.
117. Glinicka, A. Reduction of the bearing capacity of a thin-walled steel beam-column as a result of uniform corrosion / A. Glinicka, M. Maciąg // MATEC Web of Conferences / ed. by V. Andreev, T. Matseevich, A. Ter-Martirosyan, A. Adamtsevich. – 2018. – Vol. 196 – P. 01046 – DOI:10.1051/mateconf/201819601046.
118. Graves, S.T. The effect of initial imperfections on the strength of thin-walled box columns / S.T. Graves // International Journal of Mechanical Sciences. – 1971. – Vol. 13 – № 11 – P. 911–925.
119. Harstead, A. Inelastic H-columns under biaxial bending / A. Harstead, C. Birnstiel, K. Leu // Journal of the Structural Division of the ASCE. – 1968. – Vol. 10 – № 94 – P. 2371–2398.
120. Johnston, B.G. Columns of Rolled Wide-Flange Section Progress Report No. 2 / B.G. Johnston, L.T. Cheney. – AISC Research Report No. 191 (Nov. 1942), Lehigh University. Lehigh, 1942. – P. 39.
121. Johnston, B.G. Steel Columns of Rolled Wide-Flange Section Progress Report No.1 / B.G. Johnston, H.L. Whittemore, L.T. Cheney. – AISC Research Report No. 190 Lehigh University. Lehigh, 1942. – P. 39.
122. Kloppel, K. Experimentelle und the oretische Untersuchungen uber die Traglast von zweichzig ausermitting gedruckten Stahlsaben / K. Kloppel, E. Winkelmann. – Der Stahlbau, 1962. – № 2–3 – P. 78–87.
123. Lee, H.P. A finite element investigation of the postbuckling strength of thin-walled structural members under compression / H.P. Lee, P.J. Harris // Con. J. Gw. Eng. – 1978. – T. 5 – № 4 – C. 595–610.

124. Neut, A. Proceedings of the 12th International Congress for applied mechanics / Neut. – Berlin, 1968. – 389 p.
125. Paik, J.K. Ultimate strength of dented steel plates under axial compressive loads / J.K. Paik, J.M. Lee, D.H. Lee // International Journal of Mechanical Sciences. – 2003. – Vol. 45 – № 3 – P. 433–448 – DOI:10.1016/S0020-7403(03)00062-6.
126. Raviprakash, A.V. Residual ultimate compressive strength of dented square plates / A.V. Raviprakash, B. Prabu, N. Alagumurthi // Thin-Walled Structures. – 2012. – Vol. 58 – P. 32–39 – DOI:10.1016/j.tws.2012.04.009.
127. Saad-Eldeen, S. Ultimate strength analysis of highly damaged plates / S. Saad-Eldeen, Y. Garbatov, C.G. Soares // Marine Structures. – 2016. – Vol. 45 – P. 63–85 – DOI:10.1016/j.marstruc.2015.10.006.
128. Shi, G. Tests and numerical study of ultra-high strength steel columns with end restraints / G. Shi, H.Y. Ban, F.S.K. Bijlaard. – J. Constr. Steel Res. 70, 2012. – P. 236–247.
129. Stang, A.H. Tests of Eight Large H-Shaped Columns Fabricated from Carbon-Manganese Steel / A.H. Stang, H.L. Whittemore, L.R. Sweetman. – Journal of Research of National Bureau of Standards, 1936. – № 16 – P. 595–626.
130. Svensson, S.E. Interaction between local and overall buckling / S.E. Svensson, J.G. Croll // Int J. Mech. Sei. – 1977. – T. 17 – № 4 – C. 307–321.
131. Yasser Sharifi, V. Residual web bearing capacity of corroded steel beams / V. Yasser Sharifi. – Advanced Steel Construction, 2012. – Vol. 3 – № 8 – P. 242–255 – DOI:10.18057/IJASC.2012.8.3.
132. Zhengyi, K. Experimental and theoretical study on mechanical properties of mild steel after corrosion / K. Zhengyi, H. Golder Md Sabbir, H. Shaozheng, W. Yan, V. Quang-Viet, T. Viet-Hung, T. Qinglin // Ocean Engineering. – 2022. – Vol. 246 – P. 110652 – DOI:10.1016/j.oceaneng.2022.110652.
133. Zhongwei, Z. Shear capacity of steel plates with random local corrosion / Z. Zhongwei, Z. Ni, W. Jinjia, G. Youran, S. Qingwei, K. Seung-Eock // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 239 – P. 117816 – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117816.

Приложение 1. Диаграммы растяжения сталей

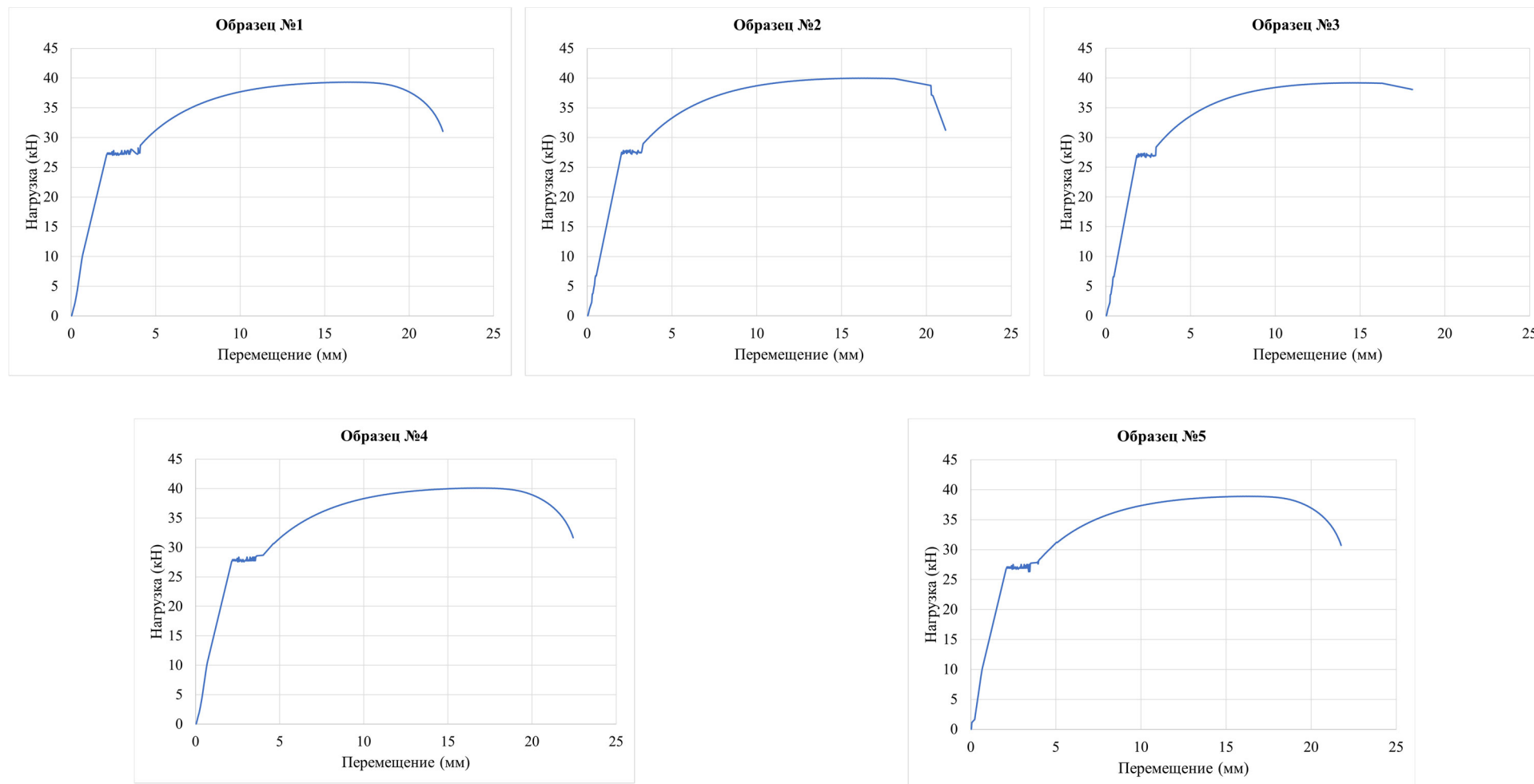


Рисунок 1.1 Графики испытаний на растяжение результаты см. Таблица 4.2

Приложение 2. Акт внедрения



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

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

15.05.2026 № 218

На № _____

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертационной работы аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Матвеева Егора Андреевича «Несущая способность стержневых элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями».

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертации Матвеева Егора Андреевича «Несущая способность стержневых элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями» используются специалистами ООО «НИПИ «ЭРКОН» (ООО «Научно-исследовательский и проектный институт «Эксплуатационный ресурс конструкций») в практической работе при проведении реконструкции и техническом перевооружении действующих промышленных предприятий.

Разработанный в диссертации практический метод расчета, позволяет более обоснованно оценивать техническое состояние эксплуатируемых элементов стальных конструкций, имеющих дефекты и повреждения, что в практическом применении обеспечивает экономию металла, снижении трудозатрат и сокращении сроков восстановительных работ.

Главный инженер проекта ООО «НИПИ «ЭРКОН»

 А.А. Смирнов

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

 Н.А. Пяткин

